OCTAVA EDICIÓN

Biología

LA VIDA EN LA TIERRA

PEARSON Prentice Hall ®

AUDESIRK AUDESIRK BYERS

VISIT…

Biología

LA VIDA EN LA TIERRA

OCTAVA EDICIÓN

Teresa Audesirk
University of Colorado at Denver and Health Science Center

Gerald Audesirk
University of Colorado at Denver and Health Science Center

Bruce E. Byers
University of Massachusetts, Amherst

TRADUCCIÓN

Augusta Victoria Flores Flores
Traductora profesional

REVISIÓN TÉCNICA

Vicente Gerardo Hernández Hernández
Preparatoria de la Universidad La Salle

Paula Cortés García
Colegio Gimnasio del Norte
Bogotá, Colombia

Víctor Hugo Blanco Lozano
ITESM Campus Puebla

PEARSON Educación ®

Datos de catalogación bibliográfica

AUDESIRK TERESA; AUDESIRK GERALD; BYERS, BRUCE E.
Biología: La vida en la Tierra

Pearson Educación de México, 2008

ISBN 978-970-26-1194-3
Área: Ciencias

Formato 21 × 27 Páginas: 1024

Authorized translation from the English Language edition, entitled *Biology: Life on earth with physiology, 8th Edition* by *Teresa Audesirk, Gerald Audesirk and Bruce E. Byers*, published by Pearson Education Inc., publishing as PRENTICE HALL INC., Copyright ©2008. All rights reserved.
Versión en español de la obra titulada *Biology: Life on earth with physiology, 8ª edición,* de *Teresa Audesirk, Gerald Audesirk y Bruce E. Byers*, publicada originalmente en inglés por Pearson Education Inc., publicada como PRENTICE HALL INC., Copyright ©2008. Todos los derechos reservados.

ISBN 0-13-195766-X

Esta edición en español es la única autorizada.

Edición en español

Editor:	Enrique Quintanar Duarte
e-mail:	enrique.quintanar@pearsoned.com
Editor de desarrollo:	Felipe Hernández Carrasco
Supervisor de producción:	Rodrigo Romero Villalobos

OCTAVA EDICIÓN, 2008

D.R. © 2008 por Pearson Educación de México, S.A. de C.V.
Atlacomulco Núm. 500, 5° Piso
Col. Industrial Atoto
53519, Naucalpan de Juárez, Edo. de México

Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana. Reg. Núm. 1031

Prentice Hall es una marca registrada de Pearson Educación de México, S.A. de C.V.

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de esta publicación pueden reproducirse, registrarse o transmitirse, por un sistema de recuperación de información, en ninguna forma ni por ningún medio, sea electrónico, mecánico, fotoquímico, magnético o electroóptico, por fotocopia, grabación o cualquier otro, sin permiso previo por escrito del editor.

El préstamo, alquiler o cualquier otra forma de cesión de uso de este ejemplar requerirá también la autorización del editor o de sus representantes.

ISBN 10: 970-26-1194-6
ISBN 13: 978-970-26-1194-3

Impreso en México. *Printed in Mexico.*
1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 - 11 10 09 08

PEARSON Educación

Edición en inglés

Editor: Jeff Howard
Development Editor: Anne Scanlan-Rohrer
Production Editor: Tim Flem/PublishWare
Media Editor: Patrick Shriner
Executive Managing Editor: Kathleen Schiaparelli
Editor in Chief of Development: Carol Trueheart
Media Production: nSight
Managing Editor, Science Media: Rich Barnes
Director of Marketing: Patrick Lynch
Marketing Assistant: Jessica Muraviov
Director of Creative Services: Paul Belfanti
Creative Director: Juan Lopez
Art Director: John Christiana
Interior Design: Maureen Eide
Cover Designers: Maureen Eide and John Christiana
Page Composition: PublishWare
Manufacturing Manager: Alexis Heydt-Long
Buyer: Alan Fischer
Senior Managing Editor, Art Production and Management: Patricia Burns
Manager, Production Technologies: Matthew Haas
Managing Editor, Art Management: Abigail Bass
Art Development Editor: Jay McElroy
Art Production Editor: Rhonda Aversa
Manager, Art Production: Sean Hogan
Assistant Manager, Art Production: Ronda Whitson
Illustrations: ESM Art Production; Lead Illustrators: Daniel Knopsnyder, Stacy Smith, Nathan Storck; Imagineering; Stephen Graepel
Cartographer: GeoNova, LLC
Assistant Managing Editor, Science Supplements: Karen Bosch
Editorial Assistant: Gina Kayed
Production Assistant: Nancy Bauer
Director, Image Resource Center: Melinda Reo
Manager, Rights and Permissions: Zina Arabia
Interior Image Specialist: Beth Boyd Brenzel
Cover Image Specialist: Karen Sanatar
Image Permission Coordinator: Debbie Latronica
Photo Researcher: Yvonne Gerin
Cover Photograph: Rockhopper Penguins; The Neck, Saunders Island, Falkland Islands, by Laura Crawford Williams

Resumen de Contenido

1 Introducción a la vida en la Tierra 1

UNIDAD 1 La vida de una célula 19

2 Átomos, moléculas y vida 20
3 Moléculas biológicas 36
4 Estructura y función de la célula 56
5 Estructura y función de la membrana celular 80
6 Flujo de energía en la vida de una célula 100
7 Captación de energía solar: Fotosíntesis 116
8 Obtención de energía: Glucólisis y respiración celular 132

UNIDAD 2 Herencia 147

9 DNA: La molécula de la herencia 148
10 Expresión y regulación de los genes 166
11 La continuidad de la vida: Reproducción celular 190
12 Patrones de herencia 220
13 Biotecnología 250

UNIDAD 3 Evolución y diversidad de la vida 275

14 Principios de la evolución 276
15 Cómo evolucionan los organismos 294
16 El origen de las especies 314
17 Historia de la vida 330
18 Sistemática: Búsqueda de orden en medio de la diversidad 356
19 La diversidad de los procariotas y los virus 370
20 La diversidad de los protistas 386
21 La diversidad de las plantas 402
22 La diversidad de los hongos 422
23 Diversidad animal I:Invertebrados 440
24 Diversidad animal II: Vertebrados 468

UNIDAD 4 Comportamiento y ecología 487

25 Comportamiento animal 488
26 Crecimiento y regulación de las poblaciones 512
27 Interacciones de la comunidad 536
28 ¿Cómo funcionan los ecosistemas? 558
29 Los diversos ecosistemas de la Tierra 580
30 Conservación de la biodiversidad de la tierra 610

UNIDAD 5 Anatomía y fisiología de los animales 633

31 Homeostasis y organización del cuerpo animal 634
32 Circulación 648
33 Respiración 668
34 Nutrición y digestion 684
35 El sistema urinario 706
36 Defensas contra la enfermedad 720
37 Control químico del organismo animal: El sistema endocrino 740
38 El sistema nervioso y los sentidos 760
39 Acción y sostén: Los músculos y el esqueleto 796
40 Reproducción animal 814
41 Desarrollo animal 836

UNIDAD 6 Anatomía y fisiología de las plantas 857

42 Anatomía de las plantas y transporte de nutrimentos 858
43 Reproducción y desarrollo de las plantas 886
44 Respuestas de las plantas al ambiente 908

Ensayos

GUARDIÁN DE LA TIERRA

¿Por qué devemos preservar la biodiversidad? 12
Especies en peligro de extinción: De la poza génica a los "charcos de genes" 308
Hibridación y extinción 322
El caso de las setas que desaparecen 435
Ranas en peligro 476
¿Hemos excedido la capacidad de carga de la Tierra? 528
Especies invasoras trastornan las interacciones de la comunidad 541
Las sustancias tóxicas se acumulan a lo largo de las cadenas alimentarias 566
Los polos en peligro 576
El agujero de ozono, una abertura en nuestro escudo protector 586
Restauración de los Everglades 616
Problemas intrincados: Tala, pesca y cacería furtiva 618
En defensa de las tortugas marinas 621
Recuperación de un depredador clave 624
Preservación de la biodiversidad con café cultivado a la sombra 629
Engaño endocrino 754
Las plantas ayudan a regular la distribución del agua 878
Dodós, murciélagos y ecosistemas perturbados 898

GUARDIÁN DE LA SALUD

El colesterol, aliado y enemigo 47
¿Por qué aumentamos de peso si ingerimos azúcar? 144
Sexo, envejecimiento y mutaciones 184
Cáncer, división celular mitótica descontrolada 208
Diagnóstico genético prenatal 268
Al rescate de los corazones enfermos 654
Fumar: una decisión de vida 678
Cuando se antoja una hamburguesa con queso 687
Las úlceras digieren el tracto digestivo 699
Cuando los riñones fallan 714
El combate a la influenza: ¿Es inminente una pandemia de gripe aviar? 734
Drogas, enfermedades y neurotransmisores 769
Como se repara un hueso fracturado 808
Osteoporosis: Cuando los huesos se vuelven quebradizos 810
Enfermedades de transmisión sexual 828
Reproducción con alta tecnología 831
La placenta sólo brinda una protección parcial 852
¿Eres alérgico al polen? 890

DE CERCA

Un asunto peliagudo 52
Quimiósmosis, la síntesis de ATP en los cloroplastos 124
Glucólisis 136
Reacciones de la matríz mitocondrial 141
Estructura y duplicación del DNA 159
La síntesis de proteínas, un asunto de alta energía 180
El principio de Hardy-Weinberg 298
Especiación por mutación 326
Reconstrucción de los árboles filogenéticos 362
¿Cómo se replican los virus? 382
Las branquias y los gases: Un intercambio contracorriente 674
Las nefronas y la formación de orina 712
Los iones y las señales eléctricas en las neuronas 766
El control hormonal del ciclo menstrual 826
¿Cómo absorben agua y minerales las raíces? 874

INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

Experimentos controlados, antes y ahora 6
La radiactividad en la investigación 24
En busca de la célula 64
El descubrimiento de las acuaporinas 89
El DNA es la molécula de la herencia de los bacteriófagos 152
El descubrimiento de la doble hélice 156
El RNA ya no es sólo un mensajero 183
Copias al carbón, la clonación en la naturaleza y en el laboratorio 202
Fibrosis quística 234
Aguas termales y la ciencia del calor 256
Charles Darwin: La naturaleza era su laboratorio 282
¿Cómo sabemos qué tan antiguo es un fósil? 338
La genética molecular pone al descubierto las relaciones evolutivas 365
Hormigas y acacias: Una asociación ventajosa 549
El descubrimiento de las vacunas 732
Neuroimágenes: Una mirada al interior de la "caja negra" 780
En busca de un anticonceptivo masculino 832
La promesa de las células madre 843
¿Cómo se descubrieron las hormonas vegetales? 912

GUARDIÁN DE LA BIOTECNOLOGÍA

Arroz dorado 267

ENLACES CON LA VIDA

La vida que nos rodea 14
¿Alimentación saludable? 29
¿Alimentos sintéticos? 41
Huéspedes indeseables 77
La falta de una enzima produce intolerancia a la lactosa 113
Tú vives gracias a las plantas 129
Un tarro de vino, una rebanada de pan y un tazón de col agria 139
Genética, evolución y medicina 178
Biotecnología, de lo sublime a lo ridículo 266
Los nombres científicos y la vanidad 328
Un mundo pequeño 367
Comensales indeseables 378
Recolecta con cuidado 436
Ayudantes de cirujanos 454
¿Los animales pertenecen a los laboratorios? 483
Pisar ligeramente: ¿Qué tan grande es tu "huella"? 533
Es posible hacer una diferencia 577
¿Disfrutar del chocolate y salvar selvas tropicales? 591
¿Qué pueden hacer los individuos? 630
¿Calor o humedad? 637
Quienes abandonan el hábito de fumar son ganadores 680
¿Demasiado líquido para beber? 717
Más cerca de la cura de la diabetes 756
Caminar con un perro 811
¿Por qué el parto es tan difícil? 854

CONEXIONES EVOLUTIVAS

Patas del caribú y diversidad de membranas 96
Los científicos no ponen en duda la evolución 326
Nuestros ancestros unicelulares 400
El ingenio de los hongos: Cerdos, escopetas y lazos 435
¿Los seres humanos son un éxito biológico? 482
¿Por qué juegan los animales? 508
¿El camuflaje es capaz de dividir una especie? 554
La evolución de las hormonas 756
Sentidos poco comunes 790
Adaptaciones especiales de raices, tallos y hojas 880

Contenido

Prefacio xxiii

1 Introducción a la vida en la Tierra 1

ESTUDIO DE CASO La vida en la Tierra ¿Y en algún otro lugar? 1

1.1 ¿Cómo estudian la vida los científicos? 2

La vida puede estudiarse en diferentes niveles de organización 2

Los principios científicos fundamentan toda investigación científica 3

El método científico es la base de la investigación científica 4

La comunicación es esencial para la ciencia 5

La ciencia es un esfuerzo humano 5

INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Experimentos controlados, antes y ahora 6

Las teorías científicas se han probado una y otra vez 8

1.2 Evolución: La teoría unificadora de la biología 9

Tres procesos naturales sustentan la evolución 9

1.3 ¿Cuáles son las características de los seres vivos? 10

Los seres vivos son complejos, están organizados y se componen de células 11

Los seres vivos mantienen condiciones internas relativamente constantes mediante la homeostasis 11

GUARDIÁN DE LA TIERRA ¿Por qué debemos preservar la biodiversidad? 12

Los seres vivos responden ante estímulos 13

Los seres vivos obtienen y usan materiales y energía 13

ENLACES CON LA VIDA La vida que nos rodea 14

Los seres vivos crecen 14

Los seres vivos se reproducen 14

En conjunto, los seres vivos poseen la capacidad de evolucionar 14

1.4 ¿Cómo clasifican los científicos en categorías la diversidad de los seres vivos? 14

Los dominios Bacteria y Archaea están constituidos por células; el dominio Eukarya se compone de células eucarióticas 14

Los dominios Bacteria y Archaea, así como los miembros del reino Protista, son principalmente unicelulares; los miembros de los reinos Fungi, Plantae y Animalia son básicamente multicelulares 15

Los miembros de los distintos reinos tienen formas diferentes de obtener energía 15

1.5 ¿Cómo ilumina la vida diaria el conocimiento de la biología? 15

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO La vida en la Tierra ¿y en algún otro lugar? 17

UNIDAD 1 La vida de una célula 19

2 Átomos, moléculas y vida 20

ESTUDIO DE CASO Caminando sobre el agua 21

2.1 ¿QUÉ SON LOS ÁTOMOS? 22

Los átomos, las unidades estructurales fundamentales de la materia, se componen de partículas aún más pequeñas 22

2.2 ¿CÓMO INTERACTÚAN LOS ÁTOMOS PARA FORMAR MOLÉCULAS? 23

Los átomos interactúan con otros átomos cuando hay vacíos en sus capas de electrones más externas 23

INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA La radiactividad en la investigación 24

Los átomos con carga, llamados iones, interactúan para formar enlaces iónicos 25

Los átomos sin carga pueden estabilizarse compartiendo electrones para formar enlaces covalentes 26

Los puentes de hidrógeno son atracciones eléctricas entre las moléculas que tienen enlaces covalentes polares o dentro de éstas 28

2.3 ¿Por qué el agua es tan importante para la vida? 28

El agua interactúa con muchas otras moléculas 28

ENLACES CON LA VIDA ¿Alimentación saludable? 29

Las moléculas de agua tienden a mantenerse unidas 30

Las soluciones en agua pueden ser ácidas, básicas y neutras 31

El agua modera los efectos de los cambios de temperatura 32

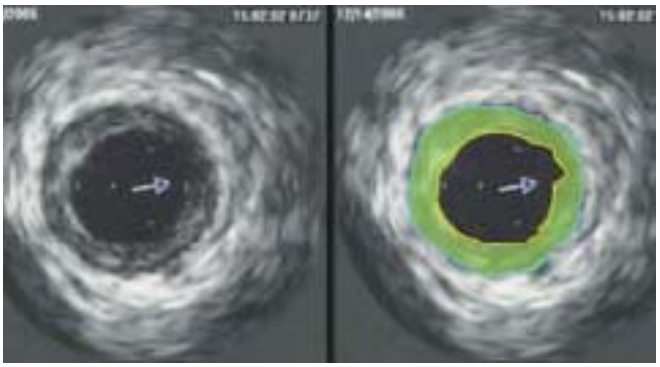
El agua forma un sólido singular: El hielo 32

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Caminando sobre el agua 33

3 Moléculas biológicas 36

ESTUDIO DE CASO Proteínas misteriosas 37

3.1 ¿Por qué el carbono es tan importante en las moléculas biológicas? 38



3.2 ¿Cómo se sintetizan las moléculas orgánicas? 38
Las moléculas biológicas se unen o se desintegran agregando o eliminando agua 39

3.3 ¿Qué son los carbohidratos? 39
Hay diversos monosacáridos con estructuras ligeramente distintas 39
ENLACES CON LA VIDA ¿Alimentos sintéticos? 41
Los disacáridos consisten en dos azúcares simples que se enlazan mediante síntesis por deshidratación 41
Los polisacáridos son cadenas de azúcares simples 42

3.4 ¿Qué son los lípidos? 44
Los aceites, las grasas y las ceras son lípidos que sólo contienen carbono, hidrógeno y oxígeno 44
Los fosfolípidos tienen "cabezas" solubles en agua y "colas" insolubles en agua 46
Los esteroides consisten en cuatro anillos de carbono fusionados 46
GUARDIÁN DE LA SALUD El colesterol, aliado y enemigo 47

3.5 ¿Qué son las proteínas? 47
Las proteínas se forman a partir de cadenas de aminoácidos 48
Los aminoácidos se unen para formar cadenas mediante síntesis por deshidratación 49
Una proteína puede tener hasta cuatro niveles de estructura 49
Las funciones de las proteínas están ligadas a sus estructuras tridimensionales 51
DE CERCA Un asunto peliagudo 52

3.6 ¿Qué son los ácidos nucleicos? 53
El DNA y el RNA (las moléculas de la herencia) son ácidos nucleicos 53
Otros nucleótidos actúan como mensajeros intracelulares y portadores de energía 53

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Proteínas misteriosas 54

4 Estructura y función de la célula 56

ESTUDIO DE CASO Repuestos para cuerpos humanos 57

4.1 ¿Qué es la teoría celular? 59

4.2 ¿Cuáles son las características básicas de las células? 59
Las funciones de las células limitan su tamaño 59
Todas las células tienen características comunes 59
Hay dos tipos básicos de células: procarióticas y eucarióticas 62

4.3 ¿Cuáles son las características principales de las células eucarióticas? 63
El citoesqueleto brinda forma, soporte y movimiento 63
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA En busca de la célula 64
Los cilios y flagelos mueven a la célula o a los líquidos para que éstos pasen por la célula 67
El núcleo es el centro de control de la célula eucariótica 67
El citoplasma eucariótico incluye un complejo sistema de membranas 70
Las vacuolas desempeñan muchas funciones, como regulación del agua, soporte y almacenamiento 72
Las mitocondrias extraen energía de las moléculas de alimento y los cloroplastos captan la energía solar 73
Las plantas utilizan plástidos para almacenamiento 74

4.4 ¿Cuáles son las características principales de las células procarióticas? 75
Las células procarióticas son pequeñas y poseen características superficiales especializadas 75
Las células procarióticas tienen menos estructuras especializadas dentro del citoplasma 76
ENLACES CON LA VIDA Huéspedes indeseables 77

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO
Respuestas para cuerpos humanos 77

5 Estructura y función de la membrana celular 80

ESTUDIO DE CASO Venenos nocivos 81

5.1 ¿Qué relación hay entre la estructura de una membrana celular y su función? 82
Las membranas celulares aíslan el contenido de la célula mientras permiten la comunicación con el ambiente 82
Las membranas son "mosaicos fluidos" en los que las proteínas se mueven dentro de las capas de lípidos 82
La bicapa de fosfolípidos es la porción fluida de la membrana 83
Una variedad de proteínas forman un mosaico dentro de la membrana 84

5.2 ¿Cómo logran las sustancias atravesar las membranas? 85
Las moléculas de los fluidos se mueven en respuesta a los gradientes 85
El movimiento a través de las membranas se efectúa mediante transporte pasivo y activo 86
El transporte pasivo incluye difusión simple, difusión facilitada y ósmosis 86
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA El descubrimiento de las acuaporinas 89
El transporte activo utiliza energía para mover moléculas en contra de sus gradientes de concentración 91
Las células absorben partículas o fluidos mediante endocitosis 92
La exocitosis saca materiales de la célula 94
El intercambio de materiales a través de las membranas influye en el tamaño y la forma de la célula 94

5.3 ¿Cómo las uniones especializadas permiten a las células establecer conexiones y comunicarse? 95
Los desmosomas unen las células 95
Las uniones estrechas impiden las filtraciones en las células 95
Las uniones en hendidura y los plasmodesmos permiten la comunicación entre células 96

CONEXIONES EVOLUTIVAS Patas de caribú y diversidad de membranas 96

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Venenos nocivos 97

6 Flujo de energía en la vida de una célula 100

ESTUDIO DE CASO Energía liberada 101

6.1 ¿Qué es energía? 102
- Las leyes de la termodinámica describen las propiedades básicas de la energía 102
- Los seres vivos utilizan la energía de la luz solar para crear las condiciones de baja entropía de la vida 103

6.2 ¿Cómo fluye la energía en las reacciones químicas? 103
- Las reacciones exergónicas liberan energía 104
- Las reacciones endergónicas requieren un aporte neto de energía 105
- Las reacciones acopladas enlazan reacciones endergónicas y exergónicas 105

6.3 ¿Cómo se transporta energía celular entre reacciones acopladas? 105
- El ATP es el principal portador de energía en las células 105
- Los portadores de electrones también transportan energía dentro de las células 107

6.4 ¿Cómo controlan las células sus reacciones metabólicas? 108
- A temperaturas corporales, las reacciones espontáneas son demasiado lentas para sustentar la vida 108
- Los catalizadores reducen la energía de activación 108
- Las enzimas son catalizadores biológicos 108
- Las células regulan el metabolismo al controlar las enzimas 110
- Los venenos, las drogas y el ambiente influyen en la actividad de las enzimas 111
- ENLACES CON LA VIDA La falta de una enzima produce intolerancia a la lactosa 113

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Energía liberada 113

7 Captación de energía solar: Fotosíntesis 116

ESTUDIO DE CASO ¿Los dinosaurios murieron por falta de luz solar? 117

7.1 ¿Qué es la fotosíntesis? 118
- Las hojas y los cloroplastos son adaptaciones para la fotosíntesis 118
- La fotosíntesis consiste en reacciones dependientes e independientes de la luz 119

7.2 Reacciones dependientes de la luz: ¿Cómo se convierte la energía luminosa en energía química? 120
- Durante la fotosíntesis, los pigmentos de los cloroplastos captan primero la luz 120
- Las reacciones dependientes de la luz se efectúan dentro de las membranas tilacoideas 121
- DE CERCA Quimiósmosis, la síntesis de ATP en los cloroplastos 124

7.3 Reacciones independientes de la luz: ¿Cómo se almacena la energía química en las moléculas de glucosa? 125
- El ciclo C_3 capta dióxido de carbono 125
- El carbono fijado durante el ciclo C_3 se utiliza para sintetizar glucosa 126

7.5 Agua, CO_2 y la vía C_4 127
- Cuando los estomas se cierran para conservar agua se lleva a cabo la derrochadora fotorrespiración 127
- Las plantas C4 reducen la fotorrespiración mediante un proceso de fijación de carbono en dos etapas 129
- Las plantas C3 y C4 se adaptan a condiciones ambientales diferentes 129
- ENLACES CON LA VIDA Tú vives gracias a las plantas 129

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO
¿Los dinosaurios murieron por falta de luz solar? 130

8 Obtención de energía: Glucólisis y respiración celular 132

ESTUDIO DE CASO Cuando los atletas aumentan el número de glóbulos rojos: ¿tienen éxito quienes engañan? 133

8.1 ¿Cómo obtienen energía las células? 134
- La fotosíntesis es la última fuente de energía celular 134
- La glucosa es una molécula clave en el almacenamiento de energía 134
- Descripción general de la descomposición de la glucosa 134

8.2 ¿Cómo se capta la energía de la glucosa durante la glucólisis? 135
- La glucólisis "descompone" la glucosa en piruvato y libera energía química 135
- En ausencia de oxígeno, la fermentación sigue a la glucólisis 135
- DE CERCA Glucólisis 136

8.3 ¿Cómo logra la respiración celular captar energía adicional de la glucosa? 138
- La respiración celular en las células eucarióticas se realiza en las mitocondrias 138
- ENLACES CON LA VIDA Un tarro de vino, una rebanada de pan y un tazón de col agria 139
- El piruvato se descompone en la matriz mitocondrial liberando más energía 139
- Los electrones de alta energía viajan a través de la cadena de transporte de electrones 140
- DE CERCA Reacciones de la matríz mitocondrial 141
- La quimiósmosis capta la energía almacenada en un gradiente de iones hidrógeno y produce ATP 141

8.4 Recapitulación 142
Un resumen de la descomposición de la glucosa en las células eucarióticas 142
La glucólisis y la respiración celular influyen en el funcionamiento de los organismos 142
GUARDIÁN DE LA SALUD ¿Por qué aumentamos de peso si ingerimos azúcar? 144
OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Cuando los atletas aumentan el número de glóbulos rojos: ¿Tienen éxito quienes engañan? 145

UNIDAD 2
Herencia 147

9 DNA: La molécula de la herencia 148

ESTUDIO DE CASO Músculos, mutaciones y miostatina 149
9.1 ¿Cómo descubrieron los científicos que los genes están compuestos de DNA? 150
La transformación bacteriana pone de manifiesto el vínculo entre los genes y el DNA 150
9.2 ¿Cuál es la estructura del DNA? 151
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA El DNA es la molécula de la herencia de los bacteriófagos 152
El DNA se compone de cuatro nucleótidos 154
El DNA es una doble hélice de dos cadenas de nucleótidos 154
Los puentes de hidrógeno entre bases complementarias mantienen unidas las dos cadenas de DNA 154
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA El descubrimiento de la doble hélice 156
9.3 ¿Cómo codifica el DNA la información? 157
9.4 ¿Cómo logra la duplicación del DNA asegurar la constancia genética durante la división celular? 157
La duplicación del DNA es un acontecimiento fundamental en la vida de una célula 157
La duplicación del DNA produce dos moléculas de DNA idénticas, cada una con una cadena original (parental) y otra nueva (cadena hija) 157

9.5 ¿Cómo ocurren las mutaciones? 158
DE CERCA Estructura y duplicación del DNA 159
La duplicación exacta y la corrección del DNA permiten lograr una duplicación del DNA casi libre de errores 162
A veces se producen errores 163
Las mutaciones van desde cambios en pares de nucleótidos solos hasta movimientos de grandes segmentos de cromosomas 163
Las mutaciones pueden tener varios efectos en la función 163
OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Músculos, mutaciones y miostatina 163

10 Expresión y regulación de los genes 166

ESTUDIO DE CASO ¡Viva la diferencia! 167
10.1 ¿Cuál es la relación entre los genes y las proteínas? 168
La mayoría de los genes contienen información para la síntesis de una sola proteína 168
El DNA da las instrucciones para la síntesis de proteínas mediante intermediarios de RNA 169
Perspectiva general: La información genética se transcribe al RNA y se traduce en proteínas 170
El código genético utiliza tres bases para especificar un aminoácido 171
10.2 ¿Cómo se transcribe la información de un gen al RNA? 172
La transcripción se inicia cuando la RNA polimerasa se une al promotor de un gen 172
El alargamiento prosigue hasta que la RNA polimerasa llega a una señal de terminación 172
10.3 ¿Cómo se traduce la secuencia de bases de una molécula de RNA mensajero a proteínas?
El RNA mensajero transporta el código para la síntesis de proteínas del DNA a los ribosomas 173
Los ribosomas consisten en dos subunidades, cada una compuesta de RNA ribosómico y proteínas 176
Las moléculas de RNA de transferencia descifran la secuencia de bases del RNAm para obtener la secuencia de aminoácidos de una proteína 176
Durante la traducción, el RNAm, el RNAt y los ribosomas cooperan para sintetizar proteínas 176
Recapitulación: Para descifrar la secuencia de bases del DNA y obtener la secuencia de aminoácidos de una proteína son necesarias la transcripción y la traducción 176
ENLACES CON LA VIDA Genética, evolución y medicina 178
10.4 ¿Cómo influyen las mutaciones del DNA en la función de los genes? 178
Las mutaciones tienen diversos efectos en la estructura y función de las proteínas 179
Inversiones y translocaciones 179
Deleciones e inserciones 179
Sustituciones 179
DE CERCA La síntesis de proteínas, un asunto de alta energía 180
Las mutaciones suministran la materia prima de la evolución 180
10.5 ¿Cómo se regulan los genes? 180
La regulación de los genes en los procariotas 181
La regulación de los genes en los eucariotas 182

INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA El RNA ya no es sólo un mensajero 183
Las células eucarióticas regulan la transcripción de genes individuales, regiones de cromosomas o cromosomas enteros 183
GUARDIÁN DE LA SALUD Sexo, envejecimiento y mutaciones 184
OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO ¡Viva la diferencia! 186

11 La continuidad de la vida: Reproducción celular 190

ESTUDIO DE CASO ¿Qué tanto vale la pena un buen bronceado? 191

11.1 ¿Cuál es la función de la reproducción celular en la vida de células individuales y de organismos completos? 192
El ciclo celular procariótico consiste en crecimiento y fisión binaria 193
El ciclo celular eucariótico consiste en la interfase y la división celular 194

11.2 ¿Cómo se organiza el dna en los cromosomas de las células eucarióticas? 195
El cromosoma eucariótico consiste en una molécula de DNA lineal unida a proteínas 195
Los cromosomas eucarióticos se presentan habitualmente en pares homólogos con información genética similar 197

11.3 ¿Cómo se reproducen las células por división celular mitótica? 199
Durante la profase los cromosomas se condensan y los microtúbulos del huso se forman y se unen a los cromosomas 200
Durante la metafase los cromosomas se alinean a lo largo del ecuador de la célula 200
Durante la anafase las cromátidas hermanas se separan y son atraídas hacia polos opuestos de la célula 200
Durante la telofase la envoltura nuclear se forma alrededor de ambos grupos de cromosomas 200
Durante la citocinesis el citoplasma se divide entre dos células hijas 200
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Copias al carbón, la clonación en la naturaleza y en el laboratorio 202
Los puntos de control regulan el progreso durante el ciclo celular 204
La actividad de enzimas específicas impulsa el ciclo celular 204
Mecanismos de regulación sobre los puntos de control 205

11.5 ¿Por qué tantos organismos se producen sexualmente? 206
Las mutaciones de DNA son la fuente última de la variabilidad genética 206
La reproducción sexual puede combinar diferentes alelos progenitores en un solo descendiente 207

11.6 ¿Cómo la división celular meiótica produce células haploides? 207
La meiosis separa los cromosomas homólogos y produce núcleos hijos haploides 207
GUARDIÁN DE LA SALUD Cáncer, división celular mitótica descontrolada 208
La división celular meiótica seguida por la fusión de gametos mantiene constante el número de cromosomas de una generación a otra 209
La meiosis I separa los cromosomas homólogos en dos núcleos haploides hijos 209
La meiosis II separa las cromátidas hermanas en cuatro núcleos hijos 213

11.7 ¿Cuándo ocurren la división celular meiótica y mitótica en el ciclo de la vida de los eucariotas? 213
En los ciclos de vida haploides, la mayoría del ciclo consta de células haploides 214
En los ciclos de vida diploides la mayoría del ciclo consiste en células diploides 215
En la alternancia del ciclo de vida de las generaciones, hay tanto etapas multicelulares haploides como diploides 215

11.8 ¿De qué forma la meiosis y la reproducción sexual originan variabilidad genética? 216
La redistribución de homólogos crea combinaciones nuevas de cromosomas 216
El entrecruzamiento crea cromosomas con combinaciones nuevas de genes 217
La fusión de gametos aporta más variabilidad genética a la descendencia 217
OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO ¿Qué tanto vale la pena un buen bronceado? 217

12 Patrones de herencia 220

ESTUDIO DE CASO Muerte súbita en la cancha 221

12.1 ¿Cuál es la base física de la herencia? 222
Los genes son secuencias de nucleótidos en lugares específicos dentro de los cromosomas 222
Los dos alelos de un organismo pueden ser iguales o diferentes 222

12.2 ¿Cómo estableció Gregor Mendel los cimientos de la genética moderna? 222
Hacer bien las cosas: Los secretos del éxito de Mendel 222

12.3 ¿Cómo se heredan los rasgos individuales? 223

La hipótesis de Mendel sirve para predecir el resultado de nuevos tipos de cruzas de rasgos individuales 226

12.4 ¿Cómo se heredan los rasgos múltiples? 227
Mendel planteó la hipótesis de que los rasgos se heredan de forma independiente 227
En un mundo no preparado, el genio podría pasar inadvertido 228

12.5 ¿Cómo se heredan los genes localizados en un mismo cromosoma? 229
Los genes que están en un mismo cromosoma tienden a heredarse juntos 229
La recombinación crea nuevas combinaciones de alelos ligados 230

12.6 ¿Cómo se determina el sexo y cómo se heredan los genes ligados a los cromosomas sexuales? 231
Los genes ligados a los cromosomas sexuales se encuentran sólo en el cromosoma *X* o sólo en el cromosoma *Y* 231

12.7 ¿Las leyes mendelianas de la herencia se aplican a todos los rasgos? 233
Dominancia incompleta: el fenotipo de los heterocigotos es un intermedio entre los fenotipos de los homocigotos 233
Un solo gen puede tener múltiples alelos 233
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Fibrosis quística 234
Muchos rasgos reciben influencia de varios genes 235
Los genes individuales comúnmente tienen múltiples efectos en el fenotipo 235
El ambiente influye en la expresión de los genes 237

12.8 ¿Cómo se investigan las anomalías genéticas humanas? 237

12.9 ¿Cómo se heredan las anomalías humanas originadas por genes individuales? 238
Algunas anomalías genéticas humanas se deben a alelos recesivos 238
Algunas anomalías genéticas humanas se deben a alelos dominantes 239
Algunas anomalías humanas están ligadas a los cromosomas sexuales 240

12.10 ¿Cómo afectan a los seres humanos los errores en el número de cromosomas? 240
Ciertas anomalías genéticas humanas se deben a un número anormal de cromosomas sexuales 241
Ciertas anomalías genéticas humanas se deben a un número anormal de autosomas 243

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO
Muerte súbita en la cancha 244

13 Biotecnología 250

ESTUDIO DE CASO ¿Culpable o inocente? 251

13.1 ¿Qué es la biotecnología? 252

13.2 ¿Cómo se recombina el DNA en la naturaleza? 252

13.3 ¿Cómo se emplea la biotecnología en la ciencia forense? 254
La reacción en cadena de la polimerasa amplifica una secuencia específica de DNA 254
La elección de los iniciadores determina cuáles secuencias de DNA se amplifican 255
La electroforesis en gel separa los segmentos del DNA 256
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Aguas termales y la ciencia del calor 256
Las sondas de DNA se emplean para etiquetar secuencias de nucleótidos específicas 257
Cada individuo tiene su propio perfil de DNA 258

13.4 ¿Cómo se utiliza la biotecnología en la agricultura? 258
Muchos cultivos se modifican genéticamente 258
Las plantas genéticamente modificadas sirven para elaborar medicamentos 260
Los animales genéticamente modificados pueden ser de utilidad en agricultura y en medicina 261

13.5 ¿Cómo se emplea la biotecnología para aprender sobre el genoma humano? 261

13.6 ¿Cómo se utiliza la biotecnología en el diagnóstico médico y en el tratamiento de las enfermedades? 262
La tecnología del DNA puede emplearse para diagnosticar trastornos hereditarios 262
La tecnología del DNA ayuda a tratar las enfermedades 264

13.7 ¿Cuáles son las principales implicaciones éticas de la biotecnología moderna? 265
ENLACES CON LA VIDA Biotecnología, de lo sublime a lo ridículo 266
¿Deberían permitirse en la agricultura los organismos genéticamente modificados? 266
GUARDIÁN DE LA BIOTECNOLOGÍA Arroz dorado 267
GUARDIÁN DE LA SALUD Diagnóstico genético prenatal 268
¿Debería cambiarse el genoma humano con la biotecnología? 270

UNIDAD 3 Evolución y diversidad de la vida 275

14 Principios de la evolución 276

ESTUDIO DE CASO ¿Qué tan útiles son las muelas del juicio? 277

14.1 ¿Cómo se desarrollaron las ideas sobre la evolución? 278
- Los primeros estudios de biología no incluían el concepto de evolución 278
- La exploración de nuevos territorios reveló una sorprendente diversidad de la vida 279
- Algunos científicos especularon que la vida había evolucionado 279
- Los descubrimientos de fósiles demostraron que la vida había cambiado a lo largo del tiempo 279
- Algunos científicos idearon explicaciones no evolutivas a partir de los fósiles 280
- La geología ofreció la evidencia de que la Tierra es sumamente antigua 280
- Algunos biólogos anteriores a Darwin propusieron mecanismos de evolución 281
- Darwin y Wallace describieron un mecanismo de evolución 281
- INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Charles Darwin: La naturaleza era su laboratorio 282

14.2 ¿Cómo sabemos que ha habido evolución? 282
- Los fósiles ofrecen evidencias del cambio evolutivo al paso del tiempo 283
- La anatomía comparada ofrece evidencia de que la descendencia ha sufrido modificaciones 283
- Las etapas embrionarias de los animales sugieren la existencia de antepasados comunes 286
- Los análisis bioquímicos y genéticos modernos ponen de manifiesto el parentesco entre diversos organismos 286

14.3 ¿Cómo funciona la selección natural? 288
- La teoría de Darwin y Wallace se basa en cuatro postulados 288
- Postulado 1: Las poblaciones varían 288
- Postulado 2: Los rasgos se heredan 289
- Postulado 3: Algunos individuos no logran sobrevivir y reproducirse 289
- Postulado 4: El éxito reproductivo no es aleatorio 289
- La selección natural modifica las poblaciones al paso del tiempo 289

14.4 ¿Qué pruebas se tienen de que las poblaciones evolucionan por selección natural? 289
- La reproducción controlada modifica los organismos 289
- La evolución por selección natural ocurre en la actualidad 290

14.5 Epílogo de Charles Darwin 292

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO
Qué tan útiles son las muelas del juicio 292

15 Cómo evolucionan los organismos 294

ESTUDIO DE CASO Evolución de una amenaza 295

15.1 ¿Cómo se relacionan las poblaciones, los genes y la evolución? 296
- La evolución es el cambio de la frecuencia de alelos dentro de una población 297
- La población en equilibrio es una población hipotética donde no ocurre la evolución 297
- DE CERCA El principio de Hardy-Weinberg 298

15.2 ¿Qué causa la evolución? 298
- Las mutaciones son la fuente original de la variabilidad genética 298
- El flujo de genes entre poblaciones cambia las frecuencias de alelos 300
- Las frecuencias de alelos pueden cambiar en poblaciones pequeñas 300
- El apareamiento dentro de una población casi nunca es fortuito 304
- No todos los genotipos son igualmente benéficos 304

15.3 ¿Cómo funciona la selección natural? 306
- La selección natural es en realidad una reproducción diferencial 306
- La selección natural actúa sobre los fenotipos 306
- Algunos fenotipos se reproducen con mayor éxito que otros 306
- GUARDIÁN DE LA TIERRA Especies en peligro de extinción: De la poza génica a los "charcos de genes" 308
- La selección influye en las poblaciones de tres formas 309

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO
Evolución de una amenaza 311

16 El origen de las especies 314

ESTUDIO DE CASO Un mundo perdido 315

16.1 ¿QUÉ ES UNA ESPECIE? 316
- Los biólogos necesitan una clara definición de especie 316
- Las especies son grupos de poblaciones que se cruzan entre sí 316
- La apariencia resulta engañosa 316

16.2 ¿Cómo se conserva el aislamiento reproductivo entre las especies? 317
- Los mecanismos de aislamiento anteriores al apareamiento impiden que especies diferentes se apareen 317
- Los mecanismos de aislamiento posteriores al apareamiento limitan la descendencia híbrida 319

16.3 ¿Cómo se forman nuevas especies? 320
- La separación geográfica de una población conduce a la especiación alopátrica 321
- GUARDIÁN DE LA TIERRA Hibridación y extinción 322
- El aislamiento ecológico de una población conduce a la especiación simpátrica 322
- En ciertas condiciones, pueden surgir muchas nuevas especies 324

16.4 ¿A qué se debe la extinción? 324
La distribución localizada y la especialización excesiva aumentan la vulnerabilidad de las especies ante los cambios ambientales 324
Las interacciones con otros organismos pueden llevar a una especie a su extinción 325
DE CERCA Especiación por mutación 326
El cambio y la destrucción del hábitat son las causas principales de la extinción 326
CONEXIONES EVOLUTIVAS Los científicos no ponen en duda la evolución 326
ENLACES CON LA VIDA Los nombres científicos y la vanidad 328
OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Un mundo perdido 328

17 Historia de la vida 330

ESTUDIO DE CASO Gente pequeña, historia grande 331
17.1 ¿Cómo empezó la vida? 332
Los experimentos refutaron la generación espontánea 332
Los primeros organismos vivos surgieron de los no vivos 332
El RNA pudo haber sido la primera molécula en autorreplicarse 334
Las microesferas membranosas pudieron haber encerrado las ribozimas 334
Pero, ¿realmente sucedió todo esto? 334
17.2 ¿Cómo eran los primeros organismos? 335
Los primeros organismos fueron procariotas anaerobios 335
Algunos organismos adquirieron la capacidad de captar la energía solar 337
La fotosíntesis aumentó la cantidad de oxígeno en la atmósfera 337
El metabolismo aeróbico surgió como respuesta a la crisis del oxígeno 337
Algunos organismos adquirieron organelos encerrados en membranas 337
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA ¿Cómo sabemos qué tan antiguo es un fósil? 338
17.3 ¿Cómo eran los primeros organismos multicelulares? 339
Algunas algas se volvieron multicelulares 340
La diversidad animal surgió en la era precámbrica 340
17.4 ¿Cómo llegó la vida a la tierra firme? 340
17.5 ¿Cuál ha sido el papel de la extinción en la historia de la vida? 344
La historia de la evolución ha estado marcada por extinciones periódicas en masa 345
El cambio climático contribuyó con las extinciones en masa 345
Los sucesos catastróficos pudieron haber causado las peores extinciones en masa 346
17.6 ¿Cómo evolucionaron los seres humanos? 346
Los seres humanos heredaron algunas adaptaciones de antiguos primates para vivir en los árboles 346
Los fósiles del homínido más antiguo provienen de África 347
Los homínidos más antiguos podían mantenerse en pie y caminar erguidos 347
Varias especies de *Australopithecus* surgieron en África 349
El género *Homo* se derivó del australopitecino hace 2.5 millones de años 349
La evolución del *Homo* estuvo acompañada por adelantos en la tecnología de las herramientas 349
Los hombres de Neanderthal tenían cerebros grandes y excelentes herramientas 350
Los seres humanos modernos surgieron hace menos de 200,000 años 350
Varias oleadas de homínidos emigraron de África 351
El origen evolutivo de los cerebros grandes quizás esté relacionado con el consumo de carne 351
El origen evolutivo de la conducta humana es altamente especulativo 353
La evolución cultural de los seres humanos es ahora mucho más rápida que la evolución biológica 353
OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO
Gente pequeña, historia grande 353

18 Sistemática: Búsqueda de orden en medio de la diversidad 356

ESTUDIO DE CASO El origen de un asesino 357
18.1 ¿Cómo se nombran y clasifican los organismos? 358
Cada especie tiene un nombre único constituido por dos elementos 358
La clasificación se originó como una jerarquía de categorías 358
Los sistemáticos identifican las características que revelan las relaciones evolutivas 358
La anatomía desempeña un papel clave en la sistemática 359
Las semejanzas moleculares también son útiles para reconstruir la filogenia 360
18.2 ¿Cuáles son los dominios de la vida? 360
El sistema de cinco reinos mejoró los esquemas de clasificación 360
El sistema de tres dominios refleja con más precisión la historia de la vida 360
La clasificación en términos de reinos aún no está totalmente establecida 361
DE CERCA Reconstrucción de los árboles filogenéticos 362
18.3 ¿Por qué cambian las clasificaciones? 364
La designación de las especies cambia cuando se descubre nueva información 364
La definición de especie biológica en ocasiones es difícil o imposible de aplicar 364
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

18.4 ¿Cuántas especies existen? 366
ENLACES CON LA VIDA Un mundo pequeño 367
OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DEL CASO:
El origen de un asesino 367

19 La diversidad de los procariotas y los virus 370

ESTUDIO DE CASO: Agentes de muerte 371

19.1 ¿Cuáles son los organismos que constituyen los dominios procarióticos Bacteria y Archaea? 372
Las bacterias y las arqueas son fundamentalmente diferentes 372
Los procariotas dentro de cada dominio son difíciles de clasificar 372
Los procariotas difieren en tamaño y forma 373

19.2 ¿Cómo sobreviven y se reproducen los procariotas? 373
Algunos procariotas son móviles 373
Muchas bacterias forman películas en las superficies 373
Las endosporas protectoras permiten a algunas bacterias soportar condiciones adversas 374
Los procariotas se especializan en hábitat específicos 374
Los procariotas presentan diversos tipos de metabolismo 375
Los procariotas se reproducen por fisión binaria 375
Los procariotas pueden intercambiar material genético sin reproducirse 376

19.3 ¿Cómo afectan los procariotas a los humanos y a otros eucariotas? 376
Los procariotas desempeñan papeles importantes en la nutrición animal 376
Los procariotas captan el nitrógeno que necesitan las plantas 376
Los procariotas son los recicladores de la naturaleza 376
Los procariotas pueden reducir la contaminación 377
Algunas bacterias constituyen una amenaza para la salud de los seres humanos 377
ENLACES CON LA VIDA Comensales indeseables 378

19.4 ¿Qué son los virus, los viroides y los priones? 379
Un virus consiste en una molécula de DNA o RNA envuelta en una cubierta proteica 380
Los virus son parásitos 380
Algunos agentes infecciosos son aún más simples que los virus 381
DE CERCA ¿Cómo se replican los virus? 382
Nadie sabe con certeza cómo se originaron estas partículas infecciosas 383
OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO
Agentes de muerte 384

20 La diversidad de los protistas 386

ESTUDIO DE CASO: El monstruo verde 387

20.1 ¿Qué son los protistas? 388
La mayoría de los protistas son unicelulares 389
Los protistas presentan diversas formas de nutrición 389
Los protistas emplean diversas formas de reproducción 389
Los protistas provocan efectos importantes en los humanos 390

20.2 ¿Cuáles son los principales grupos de protistas? 390
Los excavados carecen de mitocondrias 390
Los euglenozoos tienen mitocondrias características 391
Los stramenopiles incluyen organismos fotosintéticos y no fotosintéticos 392
Los alveolados incluyen parásitos, depredadores y fitoplancton 393
Los cercozoos tienen seudópodos delgados y conchas complejas 395
Los amebozoos habitan en ambientes acuáticos y terrestres 397
Las algas rojas habitan principalmente en los océanos tropicales de aguas transparentes 398
La mayoría de las algas verdes habitan en estanques y lagos 399
CONEXIONES EVOLUTIVAS
Nuestros ancestros unicelulares 400
OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO: El monstruo verde 400

21 La diversidad de las plantas 402

ESTUDIO DE CASO La reina de los parásitos 403

21.1 ¿Cuáles son las principales características de las plantas? 404
En las plantas se alternan las generaciones multicelulares haploides y diploides 404
Las plantas tienen embriones multicelulares y dependientes 404
Las plantas desempeñan un papel ecológico fundamental 404
Las plantas satisfacen las necesidades de los humanos y halagan sus sentidos 405

21.2 ¿Cuál es el origen evolutivo de las plantas? 405
Las algas verdes dieron origen a las plantas terrestres 405
Los ancestros de las plantas vivieron en aguas dulces 405

21.3 ¿Cómo se adaptaron las plantas a la vida en la tierra? 406
El cuerpo de las plantas resiste la gravedad y la sequía 406
Los embriones de las plantas están protegidos y sus células sexuales se dispersan en ausencia de agua 406

21.4 ¿Cuáles son los principales grupos de plantas? 407
Las briofitas carecen de estructuras de conducción 407
Las plantas vasculares tienen vasos conductores que también brindan sostén 410
Las plantas vasculares sin semilla incluyen los licopodios, las colas de caballo y los helechos 410
Las plantas con semilla dominan la Tierra con la ayuda de dos adaptaciones importantes: el polen y las semillas 410
Las gimnospermas son plantas con semilla que carecen de flores 410
Las angiospermas son plantas con semilla que dan flores 416
Las plantas que evolucionaron más recientemente tienen gametofitos más pequeños 416
OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO

22 La diversidad de los hongos 422

ESTUDIO DE CASO: Hongos descomunales 423

22.1 ¿Cuáles son las principales características de los hongos? 424
- El cuerpo de los hongos se compone de filamentos 424
- Los hongos obtienen sus nutrimentos de otros organismos 424
- Los hongos se propagan a través de esporas 424
- La mayoría de los hongos se pueden reproducir tanto sexual como asexualmente 425

22.2 ¿Cuáles son los principales tipos de hongos? 425
- Los quitridiomicetos producen esporas natatorias 425
- Los cigomicetos se reproducen formando esporas diploides 426
- Los ascomicetos forman esporas en una funda semejante a un saco 429
- Los basidiomicetos producen estructuras reproductoras con forma de clava 429

22.3 ¿De qué manera interactúan los hongos con otras especies? 430
- Los líquenes se componen de hongos que viven con algas o bacterias fotosintéticas 430
- Las micorrizas son hongos asociados con las raíces de plantas 432
- Los endófitos son hongos que viven dentro de los tallos y las hojas de las plantas 432
- Algunos hongos son recicladores importantes 432

22.4 ¿Cómo afectan los hongos a los seres humanos? 433
- Los hongos atacan plantas que son importantes para las personas 433
- Los hongos producen enfermedades humanas 434
- Los hongos pueden producir toxinas 434
- Muchos antibióticos se derivan de los hongos 434
- GUARDIÁN DE LA TIERRA El caso de las setas que desaparecen 435
- Los hongos hacen importantes aportaciones a la gastronomía 435
- CONEXIONES EVOLUTIVAS El ingenio de los hongos: Cerdos, escopetas y lazos 435
- ENLACES CON LA VIDA Recolecta con cuidado 436

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Hongos descomunales 437

23 Diversidad animal I: Invertebrados 440

ESTUDIO DE CASO Búsqueda de un monstruo marino 441

23.1 ¿Cuáles son las principales características de los animales? 442

23.2 ¿Qué características anatómicas marcan los puntos de bifurcación en el árbol evolutivo de los animales? 442

23.3 ¿Cuáles son los principales fila de animales? 445
- Las esponjas tienen un cuerpo simple 445
- Los cnidarios son depredadores bien armados 447
- Los gusanos planos tienen órganos pero carecen de sistemas respiratorio y circulatorio 450
- Los anélidos están formados por segmentos idénticos 451
- La mayoría de los moluscos tienen conchas 453
- ENLACES CON LA VIDA Ayudantes de cirujanos 454
- Los artrópodos son los animales que dominan la Tierra 456
- Los gusanos redondos abundan y en su mayoría son diminutos 462
- Los equinodermos tienen un esqueleto de carbonato de calcio 463
- Los cordados incluyen a los vertebrados 464

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Búsqueda de un monstruo marino 464

24 Diversidad animal II: Vertebrados 468

ESTUDIO DE CASO: Historia de peces 468

24.1 ¿Cuáles son las características distintivas de los cordados? 470
- Todos los cordados comparten cuatro estructuras distintivas 470
- Los cordados invertebrados habitan en los mares 471
- Los vertebrados tienen espina dorsal 471

24.2 ¿Cuáles son los principales grupos de vertebrados? 472
- Algunos vertebrados carecen de mandíbulas 472
- Los peces con mandíbulas dominan las aguas de la Tierra 473
- Los anfibios tienen una doble vida 475
- GUARDIÁN DE LA TIERRA Ranas en peligro 476
- Los reptiles y las aves se han adaptado a la vida terrestre 477
- Los mamíferos producen leche para sus crías 480
- CONEXIONES EVOLUTIVAS ¿Los seres humanos son un éxito biológico? 482
- ENLACES CON LA VIDA ¿Los animales pertenecen a los laboratorios? 483

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Historia de peces 484

UNIDAD 4 Comportamiento y ecología 487

25 Comportamiento animal 488

ESTUDIO DE CASO Sexo y simetría 489

25.1 ¿En qué difieren los comportamientos innatos y los aprendidos? 490
- Los comportamientos innatos no requieren experiencia previa 490
- Los comportamientos aprendidos se modifican con la experiencia 490

No hay una distinción importante entre comportamientos innatos y aprendidos 492

25.2 ¿Cómo se comunican los animales? 495
La comunicación visual es la más eficaz a distancias cortas 495
La comunicación por sonido es eficaz a distancias más largas 496
Los mensajes químicos persisten más tiempo y es difícil variarlos 496
La comunicación por tacto ayuda a establecer vínculos sociales 497

25.3 ¿Cómo compiten los animales por recursos? 497
Un comportamiento agresivo ayuda a obtener y conservar recursos 497
Las jerarquías de dominancia ayudan a controlar las interacciones agresivas 498
Los animales podrían defender territorios que contienen recursos 499

25.4 ¿Cómo encuentran pareja los animales? 501
Las señales vocales y visuales codifican el sexo, la especie y la calidad individual 501

25.5 ¿Qué tipos de sociedades forman los animales? 502
La vida en grupo tiene ventajas y desventajas 502
El comportamiento social varía entre especies 502
La formación de grupos con parientes fomenta el desarrollo del altruismo 503
Las abejas viven juntas en sociedades de estructura rígida 504
Las ratas topo desnudas forman una sociedad compleja de vertebrados 505

25.6 ¿La biología logra explicar el comportamiento humano? 506
El comportamiento de los recién nacidos tiene un componente innato importante 506
Los humanos adquieren el lenguaje fácilmente desde pequeños 506
Los comportamientos comunes a culturas diversas podrían ser innatos 507
Las personas podrían responder a feromonas 507
Estudios con gemelos revelan los componentes genéticos del comportamiento 508
La investigación biológica del comportamiento humano genera controversia 508
CONEXIONES EVOLUTIVAS ¿Por qué juegan los animales? 508

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Sexo y simetría 509

26 Crecimiento y regulación de las poblaciones 512

ESTUDIO DE CASO El misterio de la Isla de Pascua 513

26.1 ¿Cómo cambian de tamaño las poblaciones? 514
El potencial biótico puede generar un crecimiento exponencial 514

26.2 ¿Cómo se regula el crecimiento de las poblaciones? 515
El crecimiento exponencial ocurre sólo en condiciones especiales 515
La resistencia ambiental limita el crecimiento de las poblaciones 518
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Ciclos en las poblaciones de presas y depredadores 519

26.3 ¿Cómo se distribuyen las poblaciones en el espacio y en el tiempo? 524

26.4 ¿Cómo está cambiando la población humana? 526
Los demógrafos estudian los cambios en la población humana 526
La población humana continúa creciendo rápidamente 526
Los adelantos tecnológicos han incrementado la capacidad de carga de seres humanos en la Tierra 526
GUARDIÁN DE LA TIERRA ¿Hemos excedido la capacidad de carga de la Tierra? 528
El crecimiento demográfico se distribuye de manera desigual 528
La estructura de edades actual de una población predice su crecimiento futuro 529
En Europa la fertilidad está por debajo del nivel de reposición 530
La población de Estados Unidos crece rápidamente 532
ENLACES CON LA VIDA Pisar ligeramente: ¿Qué tan grande es tu "huella"? 533

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO El misterio de la Isla de Pascua 532

27 Interacciones de la comunidad 536

ESTUDIO DE CASO Invasión del mejillón cebra 537

27.1 ¿Por qué son importantes las interacciones de la comunidad? 538

27.2 ¿Cuál es la relación entre el nicho ecológico y la competencia? 538
El nicho ecológico define el lugar y el papel de cada especie en su ecosistema 538
La competencia ocurre siempre que dos organismos intentan utilizar los mismos recursos limitados 538
Las adaptaciones reducen la superposición de nichos ecológicos entre especies que coexisten 539
La competencia interespecífica contribuye a regular el tamaño de la población y la distribución de cada especie 540
La competencia dentro de una especie es un factor primordial en el control del tamaño de la población 540

27.3 ¿Cuáles son los resultados de las interacciones entre los depredadores y sus presas? 540
GUARDIÁN DE LA TIERRA Especies invasoras trastornan las interacciones de la comunidad 541
Las interacciones entre depredador y presa moldean las adaptaciones evolutivas 543

27.4 ¿Qué es la simbiosis? 547

INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Hormigas y acacias: una asociación ventajosa 549

27.5 ¿Cómo influyen las especies clave en la estructura de la comunidad? 549

27.6 Sucesión: ¿Cómo cambia una comunidad a través del tiempo? 550

Existen dos formas principales de sucesión: Primaria y secundaria 550

También hay sucesión en los estanques y lagos 553

La sucesión culmina en la comunidad clímax 553

Algunos ecosistemas se mantienen en un estado de subclímax 553

CONEXIONES EVOLUTIVAS: ¿El camuflaje es capaz de dividir una especie? 554

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO La invasión del mejillón cebra 555

28 ¿Cómo funcionan los ecosistemas? 558

ESTUDIO DE CASO El regreso del salmón 559

28.1 ¿Cuáles son las trayectorias de la energía y de los nutrimentos? 560

28.2 ¿Cómo fluye la energía a través de las comunidades? 561

La energía entra en las comunidades por la vía de la fotosíntesis 561

La energía pasa de un nivel trófico a otro 562

La transferencia de energía de un nivel trófico a otro es ineficiente 564

GUARDIÁN DE LA TIERRA Las sustancias tóxicas se acumulan a lo largo de las cadenas alimentarias 566

28.3 ¿Cómo se desplazan los nutrimentos dentro de los ecosistemas y entre ellos? 567

El ciclo del carbono pasa por la atmósfera, los océanos y las comunidades 567

La reserva principal de nitrógeno es la atmósfera 568

El ciclo del fósforo carece de componentes atmosféricos 569

La mayor parte del agua no sufre cambios químicos durante su ciclo 570

28.4 ¿A qué se debe la lluvia ácida? 571

La sobrecarga de los ciclos del nitrógeno y del azufre es la causa de la lluvia ácida 571

La sedimentación ácida daña la vida en lagos y bosques 572

La Ley del Aire Limpio ha reducido significativamente las emisiones de azufre, pero no las de nitrógeno 572

28.5 ¿Qué provoca el calentamiento global? 572

La interferencia en el ciclo del carbono contribuye al calentamiento global 572

Los gases de invernadero retienen el calor en la atmósfera 573

El calentamiento global tendrá graves consecuencias 574

¿Cómo está respondiendo la humanidad a esta amenaza? 575

GUARDIANES DE LA TIERRA Los polos en peligro 576

ENLACES CON LA VIDA Es posible hacer una diferencia 577

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO El regreso del salmón 577

29 Los diversos ecosistemas de la Tierra 580

ESTUDIO DE CASO Alas de esperanza 581

29.1 ¿Qué factores influyen en el clima de la Tierra? 582

El Sol es el motor del clima y del estado del tiempo 582

Muchos factores físicos también influyen en el clima 582

29.2 ¿Qué condiciones son necesarias para la vida? 585

GUARDIÁN DE LA TIERRA El agujero de ozono, una abertura en nuestro escudo protector 586

29.3 ¿Cómo se distribuye la vida en el medio terrestre? 585

Los biomas terrestres sostienen comunidades vegetales características 587

ENLACES CON LA VIDA ¿Disfrutar del chocolate y salvar selvas tropicales? 591

La precipitación pluvial y la temperatura determinan la vegetación que un bioma es capaz de sostener 598

29.4 ¿Cómo se distribuye la vida en el medio acuático? 598

Los ecosistemas de agua dulce incluyen lagos, corrientes y ríos 598

Los ecosistemas marinos cubren gran parte de la Tierra 601

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Alas de esperanza 607

30 Conservación de la biodiversidad de la tierra 610

ESTUDIO DE CASO De regreso de la extinción 611

30.1 ¿Qué es la biodiversidad y por qué debemos cuidarla? 612

Servicios de los ecosistemas: Usos prácticos para la biodiversidad 612

La economía ecológica reconoce el valor monetario de los servicios de los ecosistemas 614

30.2 ¿Está disminuyendo la biodiversidad de la Tierra? 615

La extinción es un proceso natural, pero las tasas se han elevado de forma alarmante 615

GUARDIÁN DE LA TIERRA Restauración de los Everglades 616

Cada vez es mayor el número de especies amenazadas por la extinción 616

30.3 ¿Cuáles son las principales amenazas contra la biodiversidad? 617

La humanidad está acabando con el "capital ecológico" de la Tierra 617

GUARDIÁN DE LA TIERRA

GUARDIÁN DE LA TIERRA En defensa de las tortugas marinas 621

30.4 ¿Cómo puede ayudar la biología de la conservación a preservar la biodiversidad? 623

Fundamentos de la biología de la conservación 623

La biología de la conservación es una ciencia integrada 623

Preservación de los ecosistemas salvajes 623

GUARDIÁN DE LA TIERRA Recuperación de un depredador clave 624

30.5 ¿Por qué la sustentabilidad es la clave de la conservación? 625

La vida y el desarrollo sustentables estimulan el bienestar ecológico y de la humanidad a largo plazo 625

Las reservas de la biosfera ofrecen modelos para la conservación y el desarrollo sustentable 626

La agricultura sustentable ayuda a preservar las comunidades naturales 627

El futuro está en tus manos 627

GUARDIÁN DE LA TIERRA Preservación de la biodiversidad con café cultivado a la sombra 629

ENLACES CON LA VIDA ¿Qué pueden hacer los individuos? 630

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO De regreso a la extinción 629

UNIDAD 5

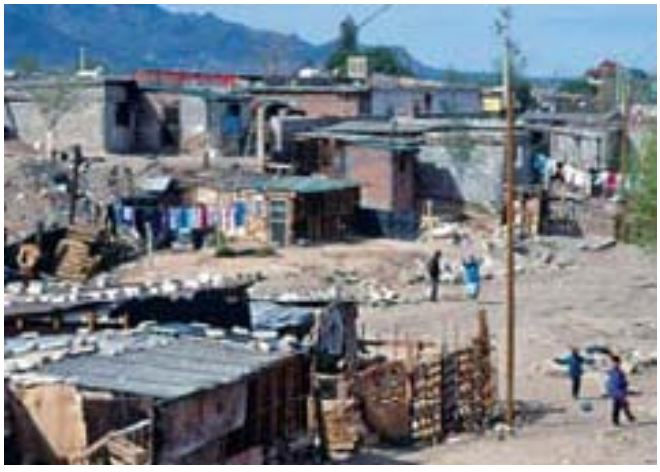
Anatomía y fisiología de los animales 633

31 Homeostasis y organización del cuerpo animal 634

ESTUDIO DE CASO ¿La vida suspendida? 635

31.1 Homeostasis: ¿Cómo regulan los animales su ambiente interno? 636

El ambiente interno se mantiene en un estado de continuidad dinámica 636



Los animales se clasifican por la forma en que regulan su temperatura corporal 636

ENLACES CON LA VIDA ¿Calor o humedad? 637

Los sistemas de retroalimentación regulan las condiciones internas 638

Los sistemas internos del cuerpo actúan de manera coordinada 639

31.2 ¿Cómo está organizado el cuerpo animal? 639

Los tejidos animales se componen de células similares que desempeñan una función específica 639

Los órganos incluyen dos o más tipos de tejidos que interactúan 643

Los sistemas de órganos consisten en dos o más órganos que interactúan 644

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO ¿La vida suspendida? 646

32 Circulación 648

ESTUDIO DE CASO Muerte súbita 649

32.1 ¿Qué características y funciones principales tienen los sistemas circulatorios? 650

Los animales tienen dos tipos de sistemas circulatorios 650

El sistema circulatorio de los vertebrados tiene muy diversas funciones 651

32.2 ¿Cómo funciona el corazón de los vertebrados? 651

Durante la evolución de los vertebrados han surgido corazones cada vez más complejos y eficientes 651

El corazón de los vertebrados consta de dos cavidades musculares que forman dos bombas individuales 652

GUARDIÁN DE LA SALUD Al rescate de los corazones enfermos 654

32.3 ¿Qué es la sangre? 657

El plasma es primordialmente agua en la que se disuelven proteínas, sales, nutrimentos y desechos 658

Los glóbulos rojos llevan oxígeno de los pulmones a los tejidos 658

Los glóbulos blancos ayudan a defender al cuerpo contra las enfermedades 659

Las plaquetas son fragmentos celulares que ayudan a coagular la sangre 659

32.4 ¿Qué tipo de vasos sanguíneos hay y qué funciones tienen? 661

Las arterias y arteriolas son vasos de paredes gruesas que transportan sangre desde el corazón 661

Los capilares son vasos microscópicos que permiten el intercambio de nutrimentos y desechos entre la sangre y las células del cuerpo 661

Las venas y vénulas llevan sangre de regreso al corazón 662

Las arteriolas controlan la distribución del flujo sanguíneo 662

32.5 ¿Cómo colabora el sistema linfático con el circulatorio? 663

Los vasos linfáticos se parecen a las venas y capilares del sistema circulatorio 664

El sistema linfático devuelve líquidos a la sangre 664

El sistema linfático transporta grasas del intestino delgado a la sangre 665

El sistema linfático ayuda a defender al cuerpo contra las enfermedades 665

33 Respiración 668

ESTUDIO DE CASO Vidas que se esfuman 669

33.1 ¿Por qué es necesario El intercambio de gases? 670

33.2 ¿Cuáles son algunas de las adaptaciones evolutivas que permiten el intercambio de gases? 670

Algunos animales de ambientes húmedos carecen de estructuras respiratorias especializadas 671

Los sistemas respiratorios facilitan el intercambio de gases por difusión 671

Las branquias facilitan el intercambio de gases en ambientes acuáticos 672

Los animales terrestres tienen estructuras respiratorias internas 672

DE CERCA Las branquias y los gases: un intercambio contracorriente 674

33.3 ¿Cómo funciona el aparato respiratorio humano? 675

La porción conductora del aparato respiratorio lleva aire a los pulmones 675

El intercambio de gases se efectúa en los alveolos 676

El oxígeno y el dióxido de carbono son transportados por mecanismos distintos 677

GUARDIÁN DE LA SALUD Fumar: una decisión de vida 678

ENLACES CON LA VIDA Quienes abandonan el hábito de fumar son ganadores 680

El aire se inhala activamente y se exhala pasivamente 680

El centro respiratorio del cerebro controla la frecuencia respiratoria 680

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Vidas que se esfuman 681

34 Nutrición y digestion 684

ESTUDIO DE CASO ¿Adelgazar hasta morir? 685

34.1 ¿Qué nutrimentos necesitan los animales? 686

La energía se obtiene de los nutrimentos y se mide en calorías 686

Los lípidos incluyen triglicéridos (grasas), fosfolípidos y colesterol 686

GUARDIÁN DE LA SALUD Cuando se antoja una hamburguesa con queso 687

Los carbohidratos son una fuente de energía rápida 688

Los aminoácidos forman los bloques de construcción de las proteínas 688

Los minerales son elementos indispensables para el cuerpo 688

Las vitaminas desempeñan diversos papeles en el metabolismo 688

Dos terceras partes del cuerpo humano se componen de agua 691

Ciertas pautas nutricionales ayudan a obtener una dieta equilibrada 691

34.2 ¿Cómo se efectúa la digestión? 692

Generalidades de la digestión 692

En las esponjas la digestión se efectúa dentro de células individuales 693

Una bolsa con una abertura es el sistema digestivo más simple 693

La digestión en un tubo permite a los animales alimentarse con mayor frecuencia 693

Especializaciones digestivas 693

34.3 ¿Cómo digieren los alimentos los seres humanos? 695

El desdoblamiento mecánico y químico de los alimentos se inicia en la boca 695

El esófago conduce los alimentos al estómago 697

Casi toda la digestión se efectúa en el intestino delgado 698

GUARDIÁN DE LA SALUD Las úlceras digieren el tracto digestivo 699

Casi toda la absorción se efectúa en el intestino delgado 700

En el intestino grueso se absorbe agua y se forman heces 701

La digestión es controlada por el sistema nervioso y ciertas hormonas 701

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO ¿Adelgazar o morir? 702

35 El sistema urinario 706

ESTUDIO DE CASO Compatibilidad perfecta 707

35.1 ¿Cuáles son las funciones básicas de los sistemas urinarios? 708

35.2 ¿Cuáles son algunos ejemplos de sistemas excretores de invertebrados? 708

Los protonefridios filtran el líquido intersticial en los platelmintos 708

Los túbulos de Malpighi filtran la sangre de los insectos 709

Los nefridios de la lombriz de tierra filtran el líquido celómico 709

35.3 ¿Qué funciones tienen los sistemas urinarios de los vertebrados? 709

Los riñones de los vertebrados filtran la sangre 709

La excreción de los desechos nitrogenados está adaptada al ambiente 709

35.4 ¿Cuáles son las estructuras y funciones del aparato urinario humano? 710

El aparato urinario consta de riñones, uréteres, vejiga y uretra 710

La orina se forma en las nefronas de los riñones 710

El filtrado se convierte en orina en el túbulo de las nefronas 712

DE CERCA Las nefronas y la formación de orina 712

GUARDIÁN DE LA SALUD Cuando los riñones fallan 714

El asa de Henle permite la concentración de la orina 714

35.5 ¿Cómo ayudan los riñones de los mamíferos a conservar la homeostasis? 715

Los riñones liberan hormonas que ayudan a regular la presión arterial y los niveles de oxígeno de la sangre 715

Los riñones vigilan y regulan las sustancias disueltas en la sangre 716

Los riñones de los vertebrados están adaptados a diversos entornos 716

ENLACES CON LA VIDA ¿Demasiado líquido para beber? 717

36 Defensas contra la enfermedad 720

ESTUDIO DE CASO Lucha contra la gripe 721

36.1 ¿Cuáles son los mecanismos de defensa básicos contra la enfermedad? 722
- Los vertebrados tienen tres principales líneas de defensa 722
- Los invertebrados poseen las dos primeras líneas de defensa 722

36.2 ¿Cómo funcionan las defensas no específicas? 723
- La piel y las membranas mucosas forman barreras externas contra la invasión 723
- Defensas internas no específicas combaten a los microbios 723

36.3 ¿Qué características clave tiene la respuesta inmunitaria? 725
- Las células del sistema inmunitario reconocen al invasor 726
- Las células del sistema inmunitario lanzan un ataque 729
- Las células del sistema inmunitario recuerdan sus victorias anteriores 730

36.4 ¿Cómo logra la atención médica mejorar la respuesta inmunitaria? 730
- Las vacunas estimulan el desarrollo de células de memoria 730
- INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA El descubrimiento de las vacunas 732
- Los antibióticos frenan la reproducción microbiana 732

36.5 ¿Qué sucede cuando el sistema inmunitario no funciona correctamente? 733
- Las alergias son respuestas inmunitarias mal dirigidas 733
- GUARDIÁN DE LA SALUD El combate a la influenza: ¿Es inminente una pandemia de gripe aviar? 734
- Una enfermedad autoinmune es una respuesta inmunitaria contra las moléculas del propio cuerpo 734
- Una enfermedad de deficiencia inmunitaria incapacita al sistema inmunitario 735
- El cáncer puede evadir o abatir la respuesta inmunitaria 736

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Lucha contra la gripe 738

37 Control químico del organismo animal: El sistema endocrino 740

ESTUDIO DE CASO Perder por el uso de hormonas artificiales 741

37.1 ¿Cómo se comunican las células animales? 742

37.2 ¿Qué características tienen las hormonas animales? 742
- Las hormonas locales se difunden hacia las células blanco adyacentes 742
- El torrente sanguíneo transporta las hormonas del sistema endocrino 742
- Las hormonas se unen a receptores específicos en las células blanco 743
- Mecanismos de retroalimentación regulan la liberación de hormonas 744
- Las hormonas endocrinas de vertebrados e invertebrados tienen asombrosas similitudes 746

37.3 ¿Qué estructuras y hormonas constituyen el sistema endocrino de los mamíferos? 746
- Las glándulas tiroides y paratiroides influyen en el metabolismo y en los niveles de calcio 750
- El páncreas es una glándula tanto exocrina como endocrina 752
- Los órganos sexuales secretan hormonas esteroides 752
- Las glándulas suprarrenales tienen dos partes que secretan hormonas distintas 753
- GUARDIÁN DE LA TIERRA Engaño endocrino 754
- Otras fuentes de hormonas comprenden la glándula pineal, el timo, los riñones, el corazón, el tracto digestivo y las células grasas 755
- ENLACES CON LA VIDA Más cerca de la cura de la diabetes 756
- CONEXIONES EVOLUTIVAS La evolución de las hormonas 756

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Perder por el uso de hormonas artificiales 757

38 El sistema nervioso y los sentidos 760

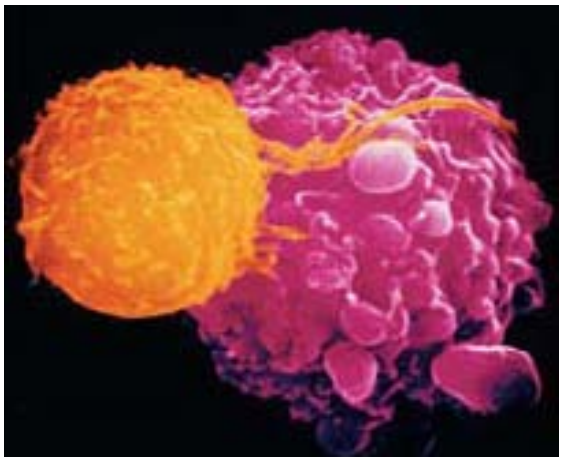
ESTUDIO DE CASO ¿Cómo te amo? 761

38.1 ¿Qué estructura y funciones tienen las neuronas? 762

38.2 ¿Cómo se genera y se transmite la actividad neuronal? 762
- Las neuronas generan voltajes eléctricos a través de sus membranas 762
- Las neuronas se comunican por las sinapsis 763

38.3 ¿Cómo se organizan los sistemas nerviosos? 764
- El procesamiento de la información en el sistema nervioso requiere de cuatro operaciones básicas 764
- DE CERCA Los iones y las señales eléctricas en las neuronas 766
- GUARDIÁN DE LA SALUD Drogas, enfermedades y neurotransmisores 769
- Los caminos neuronales dirigen el comportamiento 770
- Los sistemas nerviosos complejos están centralizados 770

38.4 ¿Cómo se organiza el sistema nervioso humano? 770
- El sistema nervioso periférico vincula al sistema nervioso central con el cuerpo 771
- El sistema nervioso central consiste en la médula espinal y el encéfalo 773
- La médula espinal es un cable de axones protegido por la espina dorsal 773
- El encéfalo consta de varias partes especializadas para desempeñar funciones específicas 774



38.5 ¿Cómo produce el encéfalo la mente? 778
El hemisferio izquierdo y el hemisferio derecho del cerebro se especializan en diferentes funciones 778
Dilucidar los mecanismos del aprendizaje y la memoria es el objetivo de profundas investigaciones 778
El conocimiento de cómo el cerebro crea la mente proviene de diversas fuentes 779
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Neuroimágenes: Una mirada al interior de la "caja negra" 780

38.6 ¿Cómo funcionan los receptores sensoriales? 781

38.7 ¿Cómo se detectan los estímulos mecánicos? 782

38.8 ¿Cómo se detecta el sonido? 782
El oído convierte las ondas sonoras en señales eléctricas 782

38.9 ¿Cómo se detecta la luz? 785
Los ojos compuestos de los artrópodos producen una imagen de mosaico 785
El ojo de los mamíferos capta y enfoca las ondas luminosas y las convierte en señales eléctricas 785

38.10 ¿Cómo se detectan las sustancias químicas? 788
Los receptores olfatorios detectan las sustancias químicas en el aire 788
Los receptores del gusto detectan las sustancias que entran en contacto con la lengua 789
El dolor es un sentido químico especializado 790
CONEXIONES EVOLUTIVAS Sentidos poco comunes 790
Ecolocalización 790
Detección de campos eléctricos 790
Detección de campos magnéticos 791

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO ¿Cómo te amo? 792

39 Acción y sostén: Los músculos y el esqueleto 796

ESTUDIO DE CASO Riesgos ocultos de los viajes espaciales 797

39.1 Una introducción a los sistemas muscular y esquelético 798

39.2 ¿Cómo trabajan los músculos? 798
La estructura y la función de las células de los músculos esqueléticos están íntimamente relacionadas 800
Las contracciones musculares son el resultado del deslizamiento de los filamentos gruesos y delgados 800
El músculo cardiaco acciona al corazón 804
El músculo liso produce contracciones lentas e involuntarias 804

39.3 ¿Qué función desempeña el esqueleto? 804
Entre los animales hay tres tipos de esqueletos 804
El esqueleto de los vertebrados desempeña muchas funciones 805

39.4 ¿Qué tejidos forman el esqueleto de los vertebrados? 806
El cartílago proporciona un sostén flexible y conexiones 806
El hueso brinda al cuerpo un armazón rígido y resistente 806
La remodelación ósea permite la reparación del esqueleto y su adaptación a las tensiones 807
GUARDIÁN DE LA SALUD Cómo se repara un hueso fracturado 808

39.5 ¿Cómo se mueve el cuerpo? 808
Los músculos mueven al esqueleto en torno a articulaciones flexibles 808
GUARDIÁN DE LA SALUD Osteoporosis: Cuando los huesos se vuelven quebradizos 810

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Riesgos ocultos de los viajes espaciales 810
ENLACES CON LA VIDA Caminar con un perro 811

40 Reproducción animal 814

ESTUDIO DE CASO El zoológico congelado 815

40.1 ¿Cómo se reproducen los animales? 816
La reproducción asexual no implica la fusión de espermatozoide y óvulo 816
La reproducción sexual requiere de la unión de un espermatozoide y un óvulo 817

40.2 ¿Cómo funciona el aparato reproductor humano? 820
La capacidad para reproducirse se inicia en la pubertad 820
El tracto reproductor masculino incluye los testículos y las estructuras accesorias 820
El tracto reproductor femenino comprende los ovarios y las estructuras accesorias 823
La cópula permite la fecundación interna 825
DE CERCA El control hormonal del ciclo menstrual 826
GUARDIÁN DE LA SALUD Enfermedades de transmisión sexual 828

40.3 ¿Cómo podemos limitar la fertilidad? 829
La esterilización es un método anticonceptivo permanente 829
La anticoncepción y el aborto evitan o ponen fin al embarazo 829
GUARDIÁN DE LA SALUD Reproducción con alta tecnología 831
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA En busca de un anticonceptivo masculino 832

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO El zoológico congelado 832

41 Desarrollo animal 836

ESTUDIO DE CASO Los rostros del síndrome de alcoholismo fetal 837

41.1 ¿En qué difieren el desarrollo indirecto y el directo? 838
Durante el desarrollo indirecto, los animales sufren un cambio radical en la forma de su cuerpo 838

Los animales recién nacidos que tienen un desarrollo directo parecen adultos en miniatura 839

41.2 ¿Cómo procede el desarrollo animal? 840
Con la segmentación del cigoto se inicia el desarrollo 841
La gastrulación forma tres capas de tejidos 841
Las estructuras adultas se desarrollan durante la organogénesis 841

41.3 ¿Cómo se controla el desarrollo? 842
Cada célula contiene todos los planos genéticos del organismo 842
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA La promesa de las células madre 843
La transcripción genética se regula con precisión durante el desarrollo 844

41.4 ¿Cómo se desarrollan los seres humanos? 845
Durante los primeros dos meses, la diferenciación y el crecimiento son muy rápidos 845
La placenta secreta hormonas y permite el intercambio de materiales entre la madre y el embrión 848
El crecimiento y el desarrollo continúan durante los últimos siete meses 850
El desarrollo culmina con el parto y el alumbramiento 850
Las hormonas del embarazo estimulan la secreción de leche 851
GUARDIÁN DE LA SALUD La placenta sólo brinda una protección parcial 852
El envejecimiento es inevitable 852
ENLACES CON LA VIDA ¿Por qué el parto es tan difícil? 854

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Los rostros del síndrome de alcoholismo fetal 854

UNIDAD 6

Anatomía y fisiología de las plantas 857

42 Anatomía de las plantas y transporte de nutrimentos 858

ESTUDIO DE CASO ¿Por qué las hojas se tiñen de rojo en el otoño? 859

42.1 ¿Cómo está organizado el cuerpo de las plantas y cómo crecen? 860
Las fanerógamas consisten en un sistema de raíces y un sistema de vástago 860
Durante el crecimiento de una planta, células meristemáticas producen células diferenciadas 861

42.2 ¿Qué tejidos y tipos de células tienen las plantas? 862
El sistema de tejido dérmico cubre el cuerpo de la planta 862
El sistema de tejido fundamental constituye casi todo el cuerpo de las plantas jóvenes 863
El sistema de tejido vascular transporta agua y nutrimentos 864

42.3 ¿Cuáles son las estructuras y funciones de las hojas, las raíces y los tallos? 865

42.4 ¿Cómo obtienen nutrimentos las plantas? 873
Las raíces obtienen minerales del suelo 873
Las relaciones simbióticas ayudan a las plantas a obtener nutrimentos 873
DE CERCA ¿Cómo absorben agua y minerales las raíces? 874

42.5 ¿Cómo transportan las plantas el agua de las raíces a las hojas? 876
El movimiento del agua en el xilema se explica con la teoría de cohesión-tensión 876
Estomas ajustables controlan la intensidad de la transpiración 877
GUARDIÁN DE LA TIERRA Las plantas ayudan a regular la distribución del agua 878

42.6 ¿Cómo transportan azúcares las plantas? 879
La teoría de flujo-presión explica el movimiento de azúcares en el floema 879
CONEXIONES EVOLUTIVAS Adaptaciones especiales de raíces, tallos y hojas 880
Algunas raíces especializadas almacenan alimento; otras realizan fotosíntesis 880
Algunos tallos especializados producen plantas nuevas, almacenan agua o alimento, o bien, producen espinas o zarcillos 880
Hojas especializadas conservan y almacenan agua y alimentos e incluso capturan insectos 881

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO ¿Por qué las hojas se tiñen de rojo en el otoño? 883

43 Reproducción y desarrollo de las plantas 886

ESTUDIO DE CASO ¿Hermoso? sí, pero ¿caliente? 887

43.1 ¿Cuáles son las características fundamentales de los ciclos de vida de las plantas? 888
Las plantas participan en el sexo 888
La alternancia de generaciones es evidente en los helechos y los musgos 889

43.2 ¿Cómo se adapta la reproducción en las plantas con semilla a los ambientes secos? 889

43.3 ¿Cuál es la función y la estructura de las flores? 889
La mayoría de las flores atraen a los animales que las polinizan 889
GUARDIÁN DE LA SALUD

Las flores completas tienen cuatro partes principales 892
El polen contiene el gametofito masculino 892
El gametofito femenino se forma dentro del óvulo del ovario 895
La polinización de la flor permite la fecundación 895

43.4 ¿Cómo se desarrollan los frutos y las semillas? 896
El fruto se desarrolla a partir del ovario 896
La semilla se desarrolla a partir del óvulo 896
GUARDIÁN DE LA TIERRA Dodós, murciélagos y ecosistemas perturbados 898

43.5 ¿Cómo germinan y crecen las semillas? 899
El estado de latencia de las semillas ayuda a asegurar la germinación en el momento apropiado 899
En la germinación, la raíz surge primero, seguida del vástago 899
Los cotiledones nutren a la semilla germinada 899

43.6 ¿Cuáles son algunas adaptaciones para la polinización y la dispersión de semillas? 900
La coevolución pone en contacto a plantas y polinizadores 900
Los frutos ayudan a dispersar las semillas 903

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO
¿Hermoso? sí, pero ¿caliente? 904

44 Respuestas de las plantas al ambiente 908

ESTUDIO DE CASO Plantas de rapiña 909

44.1 ¿Qué son las hormonas vegetales y cómo actúan? 910

44.2 ¿Cómo regulan las hormonas el ciclo de vida de las plantas? 911
El ciclo de vida de las plantas comienza con una semilla 911
INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA ¿Cómo se descubrieron las hormonas vegetales? 912
La auxina controla la orientación de la plántula que brota 913
La forma genéticamente determinada de la planta adulta es resultado de interacciones hormonales 915
La duración del día controla la floración 916
Las hormonas coordinan el desarrollo de semillas y frutos 918
La senectud y el estado de latencia preparan a la planta para el invierno 919

44.3 ¿Las plantas pueden comunicarse y moverse rápidamente? 920
Las plantas llaman a los "guardianes" cuando son atacadas 920
Las plantas podrían advertir a sus vecinos y a su descendencia de los ataques 920
Algunas plantas se mueven rápidamente 921

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Plantas de rapiña 922

Apéndice I: Conversiones del sistema métrico 925

Apéndice II: Clasificación de los principales grupos de organismos 926

Apéndice III: Vocabulario de biología: raíces, prefijos y sufijos de uso común 927

Glosario G1

Respuestas a las preguntas de pies de figura A1

Créditos fotográficos P1

Índice I1

Prefacio

Nuestros alumnos reciben y continuarán recibiendo un cúmulo de información científica, y muchas veces de información errónea, sobre una diversidad de temas: calentamiento global, cultivos manipulados mediante bioingeniería, investigación sobre células madre, enfermedad de las vacas locas y biodiversidad, entre muchos otros. En un campo en rápida expansión como el de la biología, ¿cómo se decide qué conceptos y hechos comunicar? ¿Qué tipo de conocimiento sobre biología ayudará mejor a los estudiantes a tomar decisiones informadas en relación con sus vidas, en el presente y en el futuro? ¿Qué conocimientos ayudarán a los estudiantes a prepararse mejor para los cursos más avanzados? Hemos revisado la octava edición de *Biología: La vida en la Tierra* reconociendo que no existen respuestas únicas a tales preguntas y con la idea de dar a los usuarios del libro mayores opciones.

Al consultar con educadores comprometidos en la emocionante pero desafiante misión de introducir a los alumnos en el campo de la biología, surgió un consenso: "Necesitamos ayudar a los estudiantes a estar informados en el terreno científico". El conocimiento científico da a un estudiante herramientas mentales para hacer frente al conocimiento en expansión. Esto requiere un fundamento de conocimiento fáctico que provea un marco cognoscitivo en el que pueda integrarse la nueva información. No obstante, el conocimiento científico también incluye la capacidad de captar y evaluar nuevos datos de los medios de información, como la prensa. Un individuo informado en el terreno científico reconoce la interrelación de los conceptos y la necesidad de integrar información proveniente de muchas áreas.

BIOLOGÍA: LA VIDA EN LA TIERRA COMUNICA DE MANERA EFICAZ LA RIQUEZA DE LA INFORMACIÓN CIENTÍFICA

La octava edición de *Biología: La vida en la Tierra* no sólo es un libro revisado y mejorado, sino un paquete completo de herramientas de aprendizaje para los estudiantes, y de enseñanza para los profesores. Nuestras principales metas son:

- Ayudar a los profesores a presentar la información sobre el tema en una forma que fomente el conocimiento científico entre los alumnos.
- Ayudar a los estudiantes a adquirir información de acuerdo con sus propios estilos de aprendizaje.
- Ayudar a los estudiantes a relacionar esta información con sus propias vidas, así como a comprender su importancia y relevancia.

BIOLOGÍA: LA VIDA EN LA TIERRA

…está organizado de manera clara y uniforme

En todos los capítulos, los alumnos encontrarán herramientas que les permitirán navegar a través de la información.

- Cada capítulo inicia con una sección "De un vistazo", en la que se presentan los principales apartados y ensayos de ese capítulo. Los profesores pueden asignar fácilmente —y los estudiantes podrán localizar— los temas clave dentro del capítulo.
- Las secciones principales se presentan con preguntas generales, mientras que los subtítulos son enunciados que resumen y reflejan su contenido más específico. Una importante meta pedagógica de esta organización es el énfasis en la biología como una jerarquía de conceptos interrelacionados, y no como un simple compendio de temas aislados e independientes.
- El "Resumen de conceptos clave" une importantes conceptos utilizando los títulos de mayor jerarquía en el capítulo, y su sistema de numeración permite a los profesores y estudiantes revisar la información de manera eficiente.
- Se incluyen preguntas al final de cada Estudio de caso, en muchos pies de figura, así como en la sección "Aplicación de conceptos". Estas características estimulan a los estudiantes a pensar acerca de la ciencia en vez de sólo memorizar los hechos.

…contiene ilustraciones mejoradas

A partir del consejo de los revisores y del cuidadoso escrutinio de los autores, una vez más hemos mejorado las ilustraciones. Para esta octava edición:

- ***Se agregaron y remplazaron muchas fotografías*** para ayudar a captar el interés del estudiante. La organización del libro, ahora más flexible, permitió incorporar fotografías de plantas y animales que antes sólo se describían en palabras.
- ***Continúa el énfasis en la consistencia del color*** Los colores se utilizan de manera consistente para ilustrar átomos, estructuras y procesos específicos.
- ***Se agregaron más figuras que ilustran procesos clave*** Además de volver a dibujar muchos diagramas para hacerlos más claros e interesantes, agregamos nuevas figuras que ilustran visualmente y concatenan procesos complejos, como el de la fotosíntesis y la respiración celular.
- ***Hay mayor claridad en los rótulos de las figuras*** Hemos agregado recuadros de texto dentro de las figuras para garantizar explicaciones más claras.
- ***Una vez más, en muchos pies de figura se incluyen preguntas que hacen reflexionar al estudiante*** Las respuestas a estas preguntas están disponibles por primera vez al final del libro.

…se actualizó y reorganizó

Incorporamos información acerca de descubrimientos científicos sobre los que los estudiantes quizás hayan leído en los periódicos; la información se ubica en el contexto científico para ayudar a consolidar su conocimiento. Aunque cada capítulo se revisó cuidadosamente, he aquí algunos puntos de interés de la octava edición:

- ***Unidad 1: La vida de la célula*** Nuevos casos introducen al estudiante en el terreno de la bioingeniería y le presentan los enigmáticos priones, responsables de la enfermedad de las vacas locas. En respuesta a las sugerencias de los revisores, hemos invertido el orden de presentación de los capí-

30, "Conservación de la biodiversidad de la Tierra", describe los servicios que prestan los ecosistemas y los intentos por calcular su valor para la humanidad. Se explica cómo las actividades humanas reducen la biodiversidad y se analiza cómo los esfuerzos de conservación y usos sustentables pueden preservar y restaurar los ecosistemas funcionales.

- ***Unidad 5: Anatomía y fisiología de los animales*** Esta unidad se inicia con una cobertura revisada de la homeostasis y la termorregulación. Los estudiantes encontrarán información nueva y actualizada sobre temas vigentes, que incluyen anorexia y obesidad, gripe aviar, la neuroquímica del amor, tecnología reproductiva, nuevos anticonceptivos, enfermedades de transmisión sexual, células madre y síndrome de alcoholismo fetal. Hemos conservado nuestro enfoque en el ser humano brindando información comparativa, nuevos temas como el intercambio de gases contracorriente en los peces, los túbulos de Malpighi en los insectos y nuevas secciones sobre las hormonas y las defensas contra las enfermedades de los invertebrados.

Unidad 2: Herencia

- ***Unidad 6: Anatomía y fisiología de las plantas*** Esta unidad hace alarde de muchas figuras revisadas y nuevas fotos para ilustrar mejor la anatomía y los procesos fisiológicos de las plantas, así como las fascinantes adaptaciones al ambiente. También se amplió la cobertura de los usos agrícolas de las hormonas vegetales.

…compromete y motiva a los estudiantes

Los estudiantes no pueden volverse letrados en ciencia por imposición; deben participar activamente en adquirir tanto la información como las destrezas necesarias para tal efecto. Por ello es crucial que los estudiantes reconozcan que la biología se refiere a sus vidas personales y a la vida a su alrededor. Para ayudar a los estudiantes a comprometerse y a sentirse motivados, esta nueva edición continúa ofreciendo las siguientes características:

Unidad 3: Evolución y diversidad de la vida

- ***Enlaces con la vida*** La breve sección "Enlaces con la vida", escrita de manera informal, se relaciona con temas que son familiares al estudiante, a la vez que relevantes para el capítulo.
- ***Estudios de caso*** En esta octava edición, hemos conservado y actualizado los estudios de caso más relevantes, al tiempo que se introdujeron otros nuevos. Los estudios de caso se basan en asuntos de actualidad, situaciones que atañen a los estudiantes o temas de biología particularmente fascinantes. Al final de cada capítulo, la sección "Otro vistazo al estudio de caso" permite a los estudiantes explorar el tema más a fondo a la luz de lo que aprendieron. Los estudiantes también encontrarán una investigación con mayor profundidad de cada estudio de caso en el sitio Web de este libro.

Unidad 4: Comportamiento y ecología

- ***Bioética*** Muchos temas explorados en el texto tienen implicaciones éticas para la vida humana. Entre ellos se incluyen la ingeniería genética y la clonación, el uso de animales en investigaciones y el efecto de las actividades humanas en otras especies. Ahora están identificados con un icono de bioética que alerta a los estudiantes y profesores sobre la posibilidad de discutir e investigar más ampliamente.
- ***Ensayos*** Conservamos el conjunto completo de ensayos en esta edición. Los recuadros "Guardián de la Tierra" exploran asuntos ambientales de actualidad, mientras que las secciones "Guardián de la salud" se ocupan de temas mé-

dicos. Los ensayos De cerca permiten a los profesores explorar temas selectos con mayor detalle; las secciones "Investigación científica" explican cómo se adquiere el conocimiento científico. Los ensayos bajo el título "Conexiones evolutivas" cierran algunos de los capítulos ubicando los temas en un contexto evolutivo.

…ofrece diferentes medios y complementos

- ***Instructor Resource Center*** Ningún otro libro de texto para este curso ofrece tantas opciones y tanta innovación y calidad en el apoyo al profesor. Los recursos incluyen todo el trabajo de arte del libro (con rótulos, sin rotular y susceptible de editarse), en formato JPEG y en varios archivos de PowerPoint ® que incluyen presentaciones del capítulo, así como cientos de animaciones en segunda y tercera dimensión y simulaciones para hacer presentaciones en PowerPoint ®.
- *Además incluye l*a colección más prestigiada de preguntas de examen en esta materia, revisada y actualizada.
- ***Companion Web site with Grade Tracker* (www.pearsoneducacion.net/audesirk)** Este sitio Web en inglés está disponible las 24 horas los 7 días de la semana y se enfoca en herramientas de estudio para ayudar a los estudiantes a dominar los conceptos del curso. El sitio incluye una guía de orientación *online* para organizar el estudio, cuestionarios de los capítulos para ayudar a los alumnos a determinar qué tan bien conocen la información y 103 tutoriales Web que presentan animaciones y actividades para ayudar a explicar los conceptos más desafiantes en cada capítulo.

RECONOCIMIENTOS

Biología: La vida en la Tierra es en verdad un trabajo de equipo. Nuestra editora de desarrollo Anne Scanlan-Rohrer buscó maneras de hacer el texto más claro, consistente y amigable para los alumnos. El director de arte John Christiana desarrolló y realizó un diseño fresco para esta nueva edición, y la editora de arte Rhonda Aversa coordinó hábilmente el trabajo con las ilustraciones. Las nuevas y mejoradas ilustraciones fueron diseñadas por Artworks con la ayuda de Jay McElroy. La investigadora de fotografía Ivonne Gerin buscó incansablemente fotografías excelentes. Christianne Thillen realizó el trabajo de corrección con meticulosa atención a los detalles. Tim Flem, nuestro editor de producción, reunió el trabajo de arte, las fotografías y el texto en una obra perfectamente integrada y aceptó los cambios de último momento con admirable buen ánimo. El editor de medio Patrick Shriner y la asistente de edición Crissy Dudonis coordinaron la producción de todos los medios y materiales auxiliares de estudio que hicieron posible el paquete completo de *Biología: La vida en la Tierra*. El director de marketing, Mandy Jellerichs, ayudó a crear la estrategia de marketing que comunicara de la manera más eficaz posible nuestro mensaje a la audiencia. Los editores Teresa Chung y Jeff Howard dirigieron el proyecto con energía e imaginación. Agradecemos a Teresa su fe inquebrantable en el proyecto y por reunir un fantástico equipo que lo pusiera en marcha. También agradecemos a Jeff por llevar este enorme proyecto a término con paciencia y destreza.

TERRY Y GERRY AUDESIRK
BRUCE E. BYERS

REVISORES DE LA OCTAVA EDICIÓN

George C. Argyros, *Northeastern University*
Peter S. Baletsa, *Northwestern University*
John Barone, *Columbus State University*
Michael C. Bell, *Richland College*
Melissa Blamires, *Salt Lake Community College*
Robert Boyd, *Auburn University*
Michael Boyle, *Seattle Central Community College*
Matthew R. Burnham, *Jones County Junior College*
Nicole A. Cintas, *Northern Virginia Community College*
Jay L. Comeaux, *Louisiana State University*
Sharon A. Coolican, *Cayuga Community College*
Mitchell B. Cruzan, *Portland State University*
Lewis Deaton, *University of Louisiana-Lafayette*
Dennis Forsythe, *The Citadel*
Teresa L. Fulcher, *Pellissippi State Technical Community College*
Martha Groom, *University of Washington*
Richard Hanke, *Rose State College*
Kelly Hogan, *University of North Carolina-Chapel Hill*
Dale R. Horeth, *Tidewater Community College*
Joel Humphrey, *Cayuga Community College*
James Johnson, *Central Washington University*
Joe Keen, *Patrick Henry Community College*
Aaron Krochmal, *University of Houston-Downtown*
Stephen Lebsack, *Linn-Benton Community College*
David E. Lemke, *Texas State University*
Jason L. Locklin, *Temple College*
Cindy Malone, *California State University-Northridge*
Mark Manteuffel, *St. Louis Community College*
Steven Mezik, *Herkimer County Community College*
Christine Minor, *Clemson University*
Lee Mitchell, *Mt. Hood Community College*
Nicole Moore, *Austin Peay University*
James Mulrooney, *Central Connecticut State University*
Charlotte Pedersen, *Southern Utah University*
Robert Kyle Pope, *Indiana University South Bend*
Kelli Prior, *Finger Lakes Community College*
Jennifer J. Quinlan, *Drexel University*
Robert N. Reed, *Southern Utah University*
Wenda Ribeiro, *Thomas Nelson Community College*
Elizabeth Rich, *Drexel University*
Frank Romano, *Jacksonville State University*
Amanda Rosenzweig, *Delgado Community College*
Marla Ruth, *Jones County Junior College*
Eduardo Salazar, *Temple College*

Brian W. Schwartz, *Columbus State University*
Steven Skarda, *Linn-Benton Community College*
Mark Smith, *Chaffey College*
Dale Smoak, *Piedmont Technical College*
Jay Snaric, *St. Louis Community College*
Phillip J. Snider, *University of Houston*
Gary Sojka, *Bucknell University*
Nathaniel J. Stricker, *Ohio State University*
Martha Sugermeyer, *Tidewater Community College*
Peter Svensson, *West Valley College*
Sylvia Torti, *University of Utah*
Rani Vajravelu, *University of Central Florida*
Lisa Weasel, *Portland State University*
Diana Wheat, *Linn-Benton Community College*
Lawrence R. Williams, *University of Houston*
Michelle Withers, *Louisiana State University*
Taek You, *Campbell University*
Martin Zahn, *Thomas Nelson Community College*
Izanne Zorin, *Northern Virginia Community College-Alexandria*

REALIZADORES Y REVISORES DE MEDIOS DE APOYO Y COMPLEMENTOS

Tamatha Barbeau, *Francis Marion University*
Linda Flora, *Montgomery County Community College*
Anne Galbraith, *University of Wisconsin-La Crosse*
Christopher Gregg, *Louisiana State University*
Theresa Hornstein, *Lake Superior College*
Dawn Janich, *Community College of Philadelphia*
Steve Kilpatrick, *University of Pittsburgh at Johnstown*
Bonnie L. King, *Quinnipiac University*
Michael Kotarski, *Niagara University*
Nancy Pencoe, *University of West Georgia*
Kelli Prior, *Finger Lakes Community College*
Greg Pryor, *Francis Marion University*
Mark Sugalski, *Southern Polytechnic State University*
Eric Stavney, *DeVry University*
Michelle D. Withers, *Louisiana State University*
Michelle Zurawski, *Moraine Valley Community College*

REVISORES DE EDICIONES PREVIAS

W. Sylvester Allred, *Northern Arizona University*
Judith Keller Amand, *Delaware County Community College*
William Anderson, *Abraham Baldwin Agriculture College*
Steve Arch, *Reed College*
Kerri Lynn Armstrong, *Community College of Philadelphia*
G. D. Aumann, *University of Houston*
Vernon Avila, *San Diego State University*
J. Wesley Bahorik, *Kutztown University of Pennsylvania*
Bill Barstow, *University of Georgia-Athens*
Colleen Belk, *University of Minnesota, Duluth*
Michael C. Bell, *Richland College*
Gerald Bergtrom, *University of Wisconsin*
Arlene Billock, *University of Southwestern Louisiana*
Brenda C. Blackwelder, *Central Piedmont Community College*
Raymond Bower, *University of Arkansas*
Marilyn Brady, *Centennial College of Applied Arts and Technology*
Virginia Buckner, *Johnson County Community College*
Arthur L. Buikema, Jr., *Virginia Polytechnic Institute*
J. Gregory Burg, *University of Kansas*
William F. Burke, *University of Hawaii*
Robert Burkholter, *Louisiana State University*
Kathleen Burt-Utley, *University of New Orleans*
Linda Butler, *University of Texas-Austin*
W. Barkley Butler, *Indiana University of Pennsylvania*
Jerry Button, *Portland Community College*
Bruce E. Byers, *University of Massachusetts-Amherst*
Sara Chambers, *Long Island University*
Nora L. Chee, *Chaminade University*
Joseph P. Chinnici, *Virginia Commonwealth University*
Dan Chiras, *University of Colorado-Denver*
Bob Coburn, *Middlesex Community College*
Joseph Coelho, *Culver Stockton College*
Martin Cohen, *University of Hartford*
Walter J. Conley, *State University of New York at Potsdam*
Mary U. Connell, *Appalachian State University*
Jerry Cook, *Sam Houston State University*
Joyce Corban, *Wright State University*
Ethel Cornforth, *San Jacinto College-South*
David J. Cotter, *Georgia College*
Lee Couch, *Albuquerque Technical Vocational Institute*
Donald C. Cox, *Miami University of Ohio*
Patricia B. Cox, *University of Tennessee*
Peter Crowcroft, *University of Texas--Austin*
Carol Crowder, *North Harris Montgomery College*
Donald E. Culwell, *University of Central Arkansas*
Robert A. Cunningham, *Erie Community College, North*
Karen Dalton, *Community College of Baltimore County-Catonsville Campus*
Lydia Daniels, *University of Pittsburgh*
David H. Davis, *Asheville-Buncombe Technical Community College*
Jerry Davis, *University of Wisconsin-La Crosse*
Douglas M. Deardon, *University of Minnesota*
Lewis Deaton, *University of Southwestern Louisiana*
Fred Delcomyn, *University of Illinois-Urbana*
David M. Demers, *University of Hartford*
Lorren Denney, *Southwest Missouri State University*
Katherine J. Denniston, *Towson State University*
Charles F. Denny, *University of South Carolina-Sumter*
Jean DeSaix, *University of North Carolina-Chapel Hill*
Ed DeWalt, *Louisiana State University*
Daniel F. Doak, *University of California-Santa Cruz*
Matthew M. Douglas, *University of Kansas*
Ronald J. Downey, *Ohio University*
Ernest Dubrul, *University of Toledo*
Michael Dufresne, *University of Windsor*

Susan A. Dunford, *University of Cincinnati*
Mary Durant, *North Harris College*
Ronald Edwards, *University of Florida*
Rosemarie Elizondo, *Reedley College*
George Ellmore, *Tufts University*
Joanne T. Ellzey, *University of Texas-El Paso*
Wayne Elmore, *Marshall University*
Thomas Emmel, *University of Florida*
Carl Estrella, *Merced College*
Nancy Eyster-Smith, *Bentley College*
Gerald Farr, *Southwest Texas State University*
Rita Farrar, *Louisiana State University*
Marianne Feaver, *North Carolina State University*
Susannah Feldman, *Towson University*
Linnea Fletcher, *Austin Community College-Northridge*
Charles V. Foltz, *Rhode Island College*
Dennis Forsythe, *The Citadel*
Douglas Fratianne, *Ohio State University*
Scott Freeman, *University of Washington*
Donald P. French, *Oklahoma State University*
Harvey Friedman, *University of Missouri-St. Louis*
Don Fritsch, *Virginia Commonwealth University*
Teresa Lane Fulcher, *Pellissippi State Technical Community College*
Michael Gaines, *University of Kansas*
Irja Galvan, *Western Oregon University*
Gail E. Gasparich, *Towson University*
Farooka Gauhari, *University of Nebraska-Omaha*
John Geiser, *Western Michigan University*
George W. Gilchrist, *University of Washington*
David Glenn-Lewin, *Iowa State University*
Elmer Gless, *Montana College of Mineral Sciences*
Charles W. Good, *Ohio State University-Lima*
Margaret Green, *Broward Community College*
David Grise, *Southwest Texas State University*
Lonnie J. Guralnick, *Western Oregon University*
Martin E. Hahn, *William Paterson College*
Madeline Hall, *Cleveland State University*
Georgia Ann Hammond, *Radford University*
Blanche C. Haning, *North Carolina State University*
Richard Hanke, *Rose State College*
Helen B. Hanten, *University of Minnesota*
John P. Harley, *Eastern Kentucky University*
William Hayes, *Delta State University*
Stephen Hedman, *University of Minnesota*
Jean Helgeson, *Collins County Community College*
Alexander Henderson, *Millersville University*
Timothy L. Henry, *University of Texas-Arlington*
James Hewlett, *Finger Lakes Community College*
Alison G. Hoffman, *University of Tennessee-Chattanooga*
Leland N. Holland, *Paso-Hernando Community College*
Laura Mays Hoopes, *Occidental College*
Michael D. Hudgins, *Alabama State University*
David Huffman, *Southwest Texas State University*
Donald A. Ingold, *East Texas State University*
Jon W. Jacklet, *State University of New York-Albany*
Rebecca M. Jessen, *Bowling Green State University*
J. Kelly Johnson, *University of Kansas*
Florence Juillerat, *Indiana University-Purdue University at Indianapolis*
Thomas W. Jurik, *Iowa State University*
Arnold Karpoff, *University of Louisville*
L. Kavaljian, *California State University*
Jeff Kenton, *Iowa State University*
Hendrick J. Ketellapper, *University of California, Davis*
Jeffrey Kiggins, *Blue Ridge Community College*
Harry Kurtz, *Sam Houston State University*
Kate Lajtha, *Oregon State University*
Tom Langen, *Clarkson University*
Patricia Lee-Robinson, *Chaminade University of Honolulu*
William H. Leonard, *Clemson University*
Edward Levri, *Indiana University of Pennsylvania*
Graeme Lindbeck, *University of Central Florida*
Jerri K. Lindsey, *Tarrant County Junior College-Northeast*
John Logue, *University of South Carolina-Sumter*
William Lowen, *Suffolk Community College*
Ann S. Lumsden, *Florida State University*
Steele R. Lunt, *University of Nebraska-Omaha*
Daniel D. Magoulick, *The University of Central Arkansas*
Paul Mangum, *Midland College*
Richard Manning, *Southwest Texas State University*
Ken Marr, *Green River Community College*
Kathleen A. Marrs, *Indiana University-Purdue University Indianapolis*
Michael Martin, *University of Michigan*
Linda Martin-Morris, *University of Washington*
Kenneth A. Mason, *University of Kansas*
Margaret May, *Virginia Commonwealth University*
D. J. McWhinnie, *De Paul University*
Gary L. Meeker, *California State University, Sacramento*
Thoyd Melton, *North Carolina State University*
Joseph R. Mendelson III, *Utah State University*
Karen E. Messley, *Rockvalley College*
Timothy Metz, *Campbell University*
Glendon R. Miller, *Wichita State University*
Hugh Miller, *East Tennessee State University*
Neil Miller, *Memphis State University*
Jeanne Mitchell, *Truman State University*
Jack E. Mobley, *University of Central Arkansas*
John W. Moon, *Harding University*
Richard Mortenson, *Albion College*
Gisele Muller-Parker, *Western Washington University*
Kathleen Murray, *University of Maine*
Robert Neill, *University of Texas*
Harry Nickla, *Creighton University*
Daniel Nickrent, *Southern Illinois University*
Jane Noble-Harvey, *University of Delaware*
David J. O'Neill, *Community College of Baltimore County-Dundalk Campus*
James T. Oris, *Miami University of Ohio*
Marcy Osgood, *University of Michigan*
C. O. Patterson, *Texas A&M University*
Fred Peabody, *University of South Dakota*
Harry Peery, *Tompkins-Cortland Community College*
Rhoda E. Perozzi, *Virginia Commonwealth University*
Gary B. Peterson, *South Dakota State University*
Bill Pfitsch, *Hamilton College*
Ronald Pfohl, *Miami University of Ohio*
Bernard Possident, *Skidmore College*
Ina Pour-el, *DMACC-Boone Campus*
Elsa C. Price, *Wallace State Community College*
Marvin Price, *Cedar Valley College*
James A. Raines, *North Harris College*
Paul Ramp, *Pellissippi State Technical College*
Mark Richter, *University of Kansas*
Robert Robbins, *Michigan State University*

Jennifer Roberts, *Lewis University*
Chris Romero, *Front Range Community College*
Paul Rosenbloom, *Southwest Texas State University*
K. Ross, *University of Delaware*
Mary Lou Rottman, *University of Colorado-Denver*
Albert Ruesink, *Indiana University*
Connie Russell, *Angelo State University*
Christopher F. Sacchi, *Kutztown University*
Doug Schelhaas, *University of Mary*
Brian Schmaefsky, *Kingwood College*
Alan Schoenherr, *Fullerton College*
Edna Seaman, *University of Massachusetts, Boston*
Patricia Shields, *George Mason University*
Marilyn Shopper, *Johnson County Community College*
Anu Singh-Cundy, *Western Washington University*
Linda Simpson, *University of North Carolina-Charlotte*
Russel V. Skavaril, *Ohio State University*
John Smarelli, *Loyola University*
Shari Snitovsky, *Skyline College*
John Sollinger, *Southern Oregon University*
Sally Sommers Smith, *Boston University*
Jim Sorenson, *Radford University*
Mary Spratt, *University of Missouri, Kansas City*
Bruce Stallsmith, *University of Alabama-Huntsville*
Benjamin Stark, *Illinois Institute of Technology*
William Stark, *Saint Louis University*
Barbara Stebbins-Boaz, *Willamette University*
Kathleen M. Steinert, *Bellevue Community College*
Barbara Stotler, *Southern Illinois University*
Gerald Summers, *University of Missouri-Columbia*
Marshall Sundberg, *Louisiana State University*
Bill Surver, *Clemson University*
Eldon Sutton, *University of Texas-Austin*
Dan Tallman, *Northern State University*
David Thorndill, *Essex Community College*
William Thwaites, *San Diego State University*
Professor Tobiessen, *Union College*
Richard Tolman, *Brigham Young University*
Dennis Trelka, *Washington and Jefferson College*
Sharon Tucker, *University of Delaware*
Gail Turner, *Virginia Commonwealth University*
Glyn Turnipseed, *Arkansas Technical University*
Lloyd W. Turtinen, *University of Wisconsin-Eau Claire*
Robert Tyser, *University of Wisconsin-La Crosse*
Robin W. Tyser, *University of Wisconsin-La Crosse*
Kristin Uthus, *Virginia Commonwealth University*
F. Daniel Vogt, *State University of New York-Plattsburgh*
Nancy Wade, *Old Dominion University*
Susan M. Wadkowski, *Lakeland Community College*
Jyoti R. Wagle, *Houston Community College-Central*
Lisa Weasel, *Portland State University*
Michael Weis, *University of Windsor*
DeLoris Wenzel, *University of Georgia*
Jerry Wermuth, *Purdue University-Calumet*
Jacob Wiebers, *Purdue University*
Carolyn Wilczynski, *Binghamton University*
P. Kelly Williams, *University of Dayton*
Roberta Williams, *University of Nevada-Las Vegas*
Emily Willingham, *University of Texas-Austin*
Sandra Winicur, *Indiana University-South Bend*
Bill Wischusen, *Louisiana State University*
Chris Wolfe, *North Virginia Community College*
Stacy Wolfe, *Art Institutes International*
Colleen Wong, *Wilbur Wright College*
Wade Worthen, *Furman University*
Robin Wright, *University of Washington*
Brenda L. Young, *Daemen College*
Cal Young, *Fullerton College*
Tim Young, *Mercer University*

Acerca de los autores

TERRY Y GERRY AUDESIRK crecieron en Nueva Jersey, donde se conocieron como estudiantes de licenciatura. Después de casarse en 1970, se mudaron a California, donde Terry obtuvo su doctorado en ecología marina en la Universidad del Sur de California y Gerry obtuvo su doctorado en neurobiología en el Instituto Tecnológico de California. Como estudiantes de posdoctorado en los laboratorios marinos de la Universidad de Washington, colaboraron en trabajos sobre las bases neurales del comportamiento, empleando un molusco marino como sistema modelo.

Terry y Gerry son profesores eméritos de biología en la Universidad de Colorado en Denver, donde impartieron las cátedras de introducción a la biología y neurobiología de 1982 a 2006. En su laboratorio de investigación, financiado por los Institutos Nacionales de la Salud, investigaron cómo los niveles bajos de contaminantes ambientales dañan las neuronas y cómo los estrógenos las protegen.

Terry y Gerry comparten un profundo aprecio por la naturaleza y el aire libre. Les gusta excursionar en las Rocallosas, correr cerca de su casa al pie de las montañas al oeste de Denver y tratar de mantener un huerto a 2130 metros de altitud en presencia de alces y venados hambrientos. Pertenecen desde hace tiempo a numerosas organizaciones dedicadas a la conservación del ambiente. Su hija, Heather, ha dado un nuevo enfoque a sus vidas.

BRUCE E. BYERS, originario de la región central norte de Estados Unidos, se trasladó a las colinas del oeste de Massachusetts, y se incorporó como profesor del departamento de biología de la Universidad de Massachusetts, Amherst. Desde 1993 ha sido miembro del cuerpo docente de la UMass, donde también obtuvo su doctorado. Bruce imparte cursos de introducción a la biología para estudiantes de carreras de ciencias biológicas y de otros campos; también de ornitología y comportamiento animal.

Su eterna fascinación por las aves lo llevó a explorar científicamente su biología. Sus investigaciones actuales se centran en la ecología del comportamiento de las aves, sobre todo en la función y evolución de las señales vocales que usan para comunicarse. La búsqueda de vocalizaciones a menudo obliga a Bruce a salir al campo, donde puede encontrársele antes del amanecer, con grabadora en mano, esperando los primeros trinos del nuevo día.

Para Heather, Jack y Lori y en memoria de Eve y Joe

T. A. & G. A.

A Bob y Ruth, con gratitud

B. E. B.

CAPÍTULO 17

Historia de la vida

El cráneo del *Homo floresiensis*, un pariente pequeño del ser humano, descubierto recientemente, se observa diminuto en comparación con el cráneo de un *Homo sapiens* moderno.

DE UN VISTAZO

ESTUDIO DE CASO: Gente pequeña, historia grande

17.1 ¿Cómo empezó la vida?
- Los experimentos refutaron la generación espontánea
- Los primeros organismos vivos surgieron de los no vivos
- El RNA pudo haber sido la primera molécula en autorreplicarse
- Las microesferas membranosas pudieron haber encerrado las ribozimas
- Pero, ¿realmente sucedió todo esto?

17.2 ¿Cómo eran los primeros organismos?
- Los primeros organismos fueron procariotas anaerobios
- Algunos organismos adquirieron la capacidad de captar la energía solar
- La fotosíntesis aumentó la cantidad de oxígeno en la atmósfera
- El metabolismo aeróbico surgió como respuesta a la crisis del oxígeno
- Algunos organismos adquirieron organelos encerrados en membranas

Investigación científica: ¿Cómo sabemos qué tan antiguo es un fósil?

17.3 ¿Cómo eran los primeros organismos multicelulares?
- Algunas algas se volvieron multicelulares
- La diversidad animal surgió en la era precámbrica

17.4 ¿Cómo llegó la vida a la tierra firme?
- Algunas plantas se adaptaron a la vida en tierra firme
- Algunos animales se adaptaron a la vida en tierra firme

17.5 ¿Cuál ha sido el papel de la extinción en la historia de la vida?
- La historia de la evolución ha estado marcada por extinciones periódicas en masa
- El cambio climático contribuyó con las extinciones en masa
- Los sucesos catastróficos pudieron haber causado las peores extinciones en masa

17.6 ¿Cómo evolucionaron los seres humanos?
- Los seres humanos heredaron algunas adaptaciones de antiguos primates para vivir en los árboles
- Los fósiles del homínido más antiguo provienen de África
- Los homínidos más antiguos podían mantenerse en pie y caminar erguidos
- Varias especies de *Australophitecus* surgieron en África
- El género *Homo* se derivó del australopitecino hace 2.5 millones de años
- La evolución del *Homo* estuvo acompañada por adelantos en la tecnología de las herramientas
- Los hombres de Neanderthal tenían cerebros grandes y excelentes herramientas
- Los seres humanos modernos surgieron hace menos de 200,000 años
- Varias oleadas de homínidos emigraron de África
- El origen evolutivo de los cerebros grandes quizás esté relacionado con el consumo de carne
- El origen evolutivo de la conducta humana es altamente especulativo
- La evolución cultural de los seres humanos es ahora mucho más rápida que la evolución biológica

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO
Gente pequeña, historia grande

ESTUDIO DE CASO GENTE PEQUEÑA, HISTORIA GRANDE

EL TRABAJO DE LOS PALEONTÓLOGOS, que son los científicos que estudian los fósiles, llega a ser algo tedioso. Un paleontólogo dedica meses, incluso años, a excavar lentamente en la tierra en lugares muy remotos, separando laboriosa y cuidadosamente los objetos pequeños que encuentra en el terreno y en los escombros. Si todo marcha bien, ese trabajo producirá nueva información que se sume a nuestros conocimientos sobre la historia de la evolución de la vida. Y de cuando en cuando, un paleontólogo concienzudo descubrirá algo verdaderamente sorprendente.

Un pequeño grupo de paleontólogos logaron un descubrimiento así cuando investigaban debajo del terreno de una cueva en la isla indonesia de Flores. A la mitad de una excavación tenaz, los investigadores encontraron —con gran satisfacción— el esqueleto fosilizado de lo que en un principio creían era un niño. Sin embargo, un examen más minucioso del esqueleto indicó que se trataba de un adulto completamente desarrollado, cuya estatura no sobrepasaba los 90 centímetros. Los investigadores bautizaron a esa criatura extraordinaria con el apodo de "Hobbit", y la transportaron a su laboratorio para realizar exámenes más a fondo.

A diferencia de los seres humanos pequeños de la actualidad, como los pigmeos o los enanos por deficiencia de la hormona del crecimiento producida por la pituitaria, "Hobbit" tenía un cerebro muy pequeño, más diminuto que el de un chimpancé normal. Así que "Hobbit" no era simplemente un *Homo sapiens* pequeño. Pruebas posteriores descartaron la posibilidad de que la corta estatura de "Hobbit" se debiera a una enfermedad o a un defecto genético. Los investigadores llegaron a la conclusión de que era un pariente humano de una especie desconocida hasta entonces, a la que nombraron *Homo floresiensis.*

Los huesos del espécimen *H. floresiensis* tienen aproximadamente 18,000 años de antigüedad. Los científicos consideraban que, hace 18,000 años, éramos los únicos miembros sobrevivientes del árbol genealógico humano. No obstante, ahora parece muy claro que compartimos la Tierra con parientes cercanos hasta hace relativamente poco tiempo. Es posible que en las selvas de la isla Flores, la gente se haya encontrado con los miembros de otra especie humana diminuta, y quizá todavía se descubran otros parientes humanos.

Aunque el relato del *H. floresiensis* tiene un significado especial en nuestra visión del mundo centrada en el ser humano, se trata sólo de una hebra de entre los millones que conforman la historia de la evolución de la vida. Así que dirigiremos la atención de nuestro primo "Hobbit" a un breve viaje hacia alguno de los eventos más importantes de la historia de la vida.

17.1 ¿CÓMO EMPEZÓ LA VIDA?

El pensamiento pre-darwiniano sostenía que, hacía unos cuantos miles de años, Dios había creado de forma simultánea a todas las especies conocidas. Además, hasta el siglo XIX la mayoría de la gente creía que los nuevos miembros de las especies surgían todo el tiempo gracias a la **generación espontánea**, tanto de la materia inanimada como de otras formas de vida no relacionadas. En 1609 un botánico francés escribió: "Hay un árbol [...] que se ve frecuentemente en Escocia. De este árbol caen hojas: en un lado chocan contra el agua y luego lentamente se transforman en peces; por el otro lado caen al suelo y se convierten en aves". En los escritos de la Edad Media abundan observaciones similares. Se creía que los microorganismos brotaban espontáneamente del caldo, que los gusanos aparecían de la carne y que los ratones surgían de la mezcla de camisas sudadas y trigo.

Los experimentos refutaron la generación espontánea

Recordarás que en el capítulo 1 vimos que, en 1668, el médico italiano Francesco Redi rechazó la hipótesis que relacionaba los gusanos con la carne, simplemente al mantener a las moscas (cuyos huevecillos se vuelven larvas) lejos de la carne sin contaminar. A mediados del siglo XIX, Louis Pasteur en Francia y John Tyndall en Inglaterra refutaron la idea del caldo que produce microorganismos (FIGURA 17-1). Aunque el trabajo de ambos destruyó de manera definitiva la creencia en la generación espontánea, no resolvió la pregunta de cómo se originó la vida en la Tierra. O bien, como lo expresó el bioquímico Stanley Miller, "Pasteur nunca probó que ello no sucedió una vez, pues sólo demostró que esto no sucede todo el tiempo".

Los primeros organismos vivos surgieron de los no vivos

Durante casi medio siglo, el tema se mantuvo latente. Con el tiempo, los biólogos volvieron a retomar la pregunta del origen de la vida. En las décadas de 1920 y 1930, Alexander Oparin en Rusia y John B. S. Haldane en Inglaterra observaron que la actual atmósfera rica en oxígeno no habría permitido la formación espontánea de las complejas moléculas orgánicas necesarias para la vida. El oxígeno reacciona de inmediato con otras moléculas rompiendo los enlaces químicos. Así, un ambiente rico en oxígeno tiende a mantener separadas las moléculas.

Oparin y Haldane especularon que la atmósfera de la joven Tierra habría contenido muy poco oxígeno y que, en tales condiciones atmosféricas, las complejas moléculas orgánicas surgieron gracias a reacciones químicas ordinarias. Algunos tipos de moléculas lograron sobrevivir mejor que otras en un ambiente sin vida de la joven Tierra y, por lo tanto, serían más comunes con el paso del tiempo. Esta versión química de la "supervivencia del más apto" se llama evolución *prebiótica* (que significa "antes de la vida"). En las circunstancias consideradas por Oparin y Haldane, la evolución prebiótica química dio origen a moléculas cada vez más complejas y, a la larga, a los organismos vivos.

Las moléculas orgánicas pueden formarse espontáneamente en condiciones prebióticas

Inspirados por las ideas de Oparin y Haldane, en 1951 Stanley Miller y Harold Urey se dieron a la tarea de simular la evolución prebiótica en el laboratorio. Ellos sabían que, basándose en la composición química de las rocas que se formaron al inicio de la historia de la Tierra, los geoquímicos llegaron a la conclusión de que la atmósfera primigenia prácticamente no contenía gas oxígeno; pero que sí contenía otras sustancias, como metano, amoniaco, hidrógeno y vapor de agua. Miller y Urey simularon una atmósfera sin oxígeno de la incipiente Tierra al mezclar estos componentes en un matraz. Una descarga eléctrica sustituyó la energía intensa de las tormentas eléctricas que había en aquella Tierra. Con su experimento microcósmico, los investigadores encontraron que aparecían moléculas orgánicas sencillas después de unos cuántos días (FIGURA 17-2). Experimentos similares realizados por Miller y otros produjeron aminoácidos, proteínas cortas, nucleótidos, trifosfato de adenosina (ATP) y otras moléculas características de los seres vivos.

En años recientes, nuevas evidencias convencieron a la mayoría de los geoquímicos de que la composición real de la atmósfera terrestre primigenia quizá difería de la mezcla de gases que se usaron en el experimento pionero de Miller y Urey. Esta mejor comprensión de la atmósfera primitiva, sin

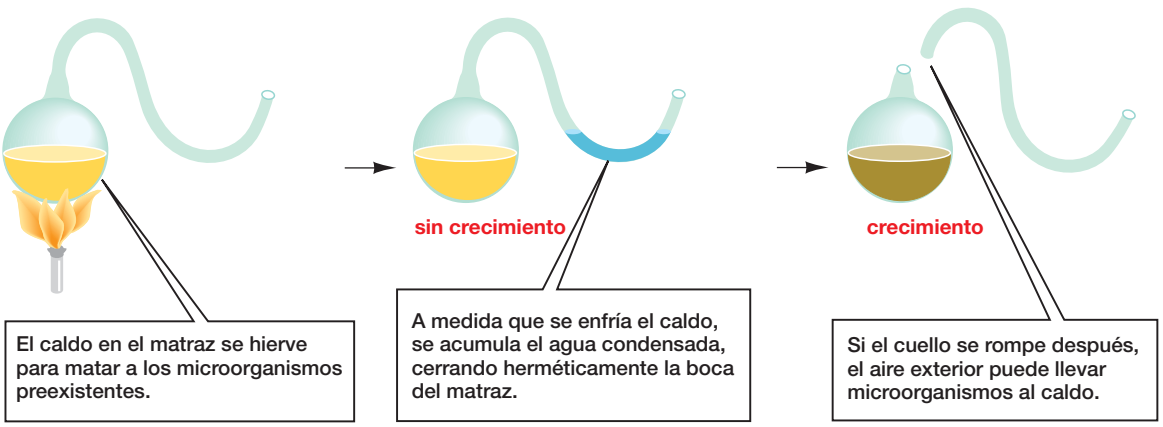

sin crecimiento
crecimiento
El caldo en el matraz se hierve para matar a los microorganismos preexistentes.
A medida que se enfría el caldo, se acumula el agua condensada, cerrando herméticamente la boca del matraz.
Si el cuello se rompe después, el aire exterior puede llevar microorganismos al caldo.

FIGURA 17-1 Refutación de la generación espontánea

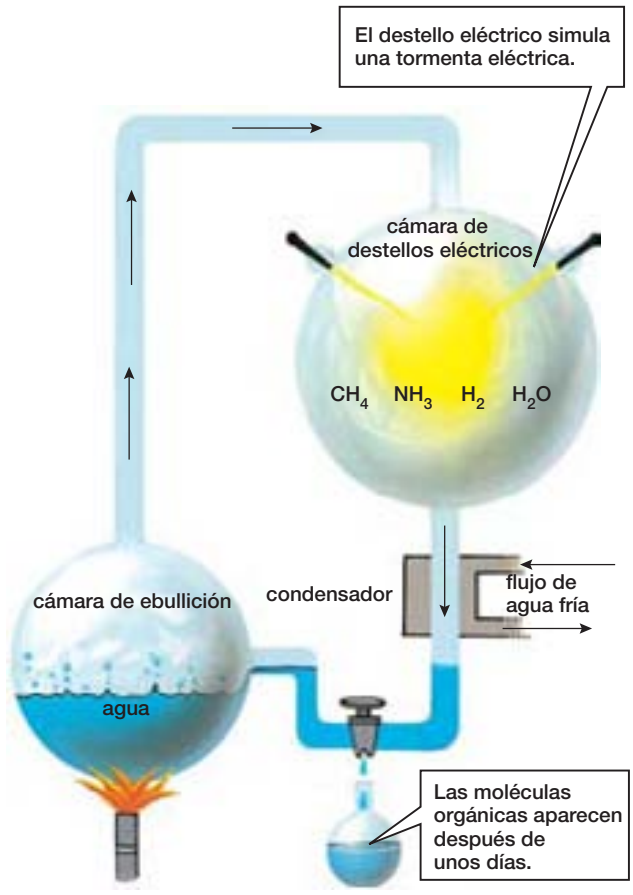

El destello eléctrico simula una tormenta eléctrica.
cámara de destellos eléctricos
CH_4 NH_3 H_2 H_2O
cámara de ebullición
condensador
flujo de agua fría
agua
Las moléculas orgánicas aparecen después de unos días.

FIGURA 17-2 Aparato del experimento de Stanley Miller y Harold Urey
Como las etapas más remotas de la vida no dejaron fósiles, los historiadores que se ocupan de la evolución desarrollaron una estrategia para reproducir en el laboratorio las condiciones que quizás hayan prevalecido en la Tierra primitiva. La mezcla de gases en la cámara de destellos simula la atmósfera primigenia de la Tierra. PREGUNTA: ¿Cómo resultaría este experimento si se agregara oxígeno en la cámara de destellos?

embargo, no ha socavado el descubrimiento fundamental logrado por el experimento de Miller y Urey. Asimismo, otros experimentos con atmósferas simuladas más reales (también sin oxígeno) produjeron moléculas orgánicas. Tales experimentos demostraron que la electricidad no es la única fuente de energía adecuada. Otras fuentes de energía disponibles en la incipiente Tierra, como el calor o la luz ultravioleta (UV), también mostraron que estimulan la formación de moléculas orgánicas en simulaciones experimentales de las condiciones prebióticas. Así, aunque nunca sepamos exactamente cómo era la atmósfera inicial, podemos estar seguros de que las moléculas orgánicas se formaron de manera espontánea en la Tierra primigenia.

Las moléculas orgánicas adicionales probablemente vinieron del espacio cuando los meteoritos y fragmentos de cometas se estrellaron contra la corteza terrestre. Los análisis actuales, realizados a los meteoritos recuperados de los cráteres que formaron al impactarse con la Tierra, revelan que algunos de ellos contienen relativamente altas concentraciones de aminoácidos y otras moléculas orgánicas sencillas. Los experimentos de laboratorio sugieren que quizá tales moléculas se formaron en el espacio interestelar antes de llegar a la Tierra. Cuando se supo que las moléculas pequeñas están presentes en el espacio, éstas se sometieron a condiciones parecidas a las del espacio, como temperatura y presión muy bajas, y se bombardearon con luz ultravioleta, por lo que se produjeron moléculas orgánicas más grandes.

Las moléculas orgánicas se pueden acumular en condiciones prebióticas

La síntesis prebiótica no era muy eficiente ni muy rápida. No obstante, en unos cuantos cientos de millones de años, grandes cantidades de moléculas orgánicas se acumularon en los océanos de la Tierra primitiva. Actualmente, la mayoría de las moléculas orgánicas tienen una vida breve porque, o bien son digeridas por los organismos vivientes o reaccionan con el oxígeno atmosférico. Sin embargo, como la joven Tierra carecía de vida y de oxígeno, las moléculas no estaban expuestas a dichas amenazas.

Incluso, tal vez las moléculas prebióticas hayan estado amenazadas por la alta energía de la radiación solar ultravioleta, porque la incipiente Tierra carecía de una capa de ozono, la cual es una región elevada de la atmósfera actual que está enriquecida con moléculas de ozono (O_3), que absorben algo de la luz solar ultravioleta antes de que llegue a la superficie terrestre. Antes de que se formara la capa de ozono, el bombardeo UV debió ser intenso. La radiación ultravioleta, como hemos visto, puede brindar energía para la formación de moléculas orgánicas; no obstante, también puede romperlas. Algunos lugares, sin embargo, como los que se encuentran debajo de arrecifes rocosos o aun en el fondo de los mares poco profundos, quizá hayan estado protegidos de la radiación ultravioleta. En tales lugares es posible que se hayan acumulado las moléculas orgánicas.

La arcilla pudo estimular la formación de moléculas orgánicas más grandes

En la siguiente etapa de la evolución prebiótica, las moléculas sencillas se combinaron para formar moléculas más grandes. Las reacciones químicas que formaron las moléculas más grandes necesitaron que las moléculas que reaccionaron se unieran estrechamente. Los científicos proponen varios procesos mediante los cuales las altas concentraciones requeridas pudieron haberse logrado en la Tierra primigenia. Una posibilidad es que las moléculas pequeñas se acumularan en la superficie de partículas de arcilla, las cuales pueden tener una pequeña carga eléctrica que atrae a las moléculas disueltas con la carga opuesta. Agrupadas en una partícula de arcilla, las moléculas pequeñas quizás hayan estado lo suficientemente apretadas como para permitir las reacciones químicas entre sí. Los investigadores han demostrado la verosimilitud de estas circunstancias con experimentos, donde agregan arcilla a soluciones en las cuales se disolvieron pequeñas moléculas biológicas, que estimulan la formación de moléculas más grandes y más complejas. Dichas moléculas pudieron haberse formado sobre la arcilla en el fondo de los océanos o lagos de la Tierra primitiva, y continuaron formando los bloques que constituyeron a los primeros organismos vivos.

El RNA pudo haber sido la primera molécula en autorreplicarse

Aunque todos los organismos vivos emplean el DNA para codificar y almacenar información genética, es improbable que el DNA fuera la molécula de información más primitiva. El DNA puede autorreplicarse sólo con la ayuda de enzimas proteínicas grandes y complejas; no obstante, las instrucciones para construir estas enzimas se codifican en el DNA mismo. Por tal razón, el origen del papel que juega el DNA como molécula para almacenamiento de información de la vida plantea el enigma "del huevo o la gallina". El DNA requiere de proteínas, pero éstas a la vez requieren del DNA. Por ello, es difícil construir un escenario verosímil para el origen del DNA autorreplicante a partir de moléculas prebióticas; por lo tanto, es probable que el sistema actual de almacenamiento de información basado en el DNA haya evolucionado a partir de un sistema anterior.

El principal candidato para la primera molécula de información autorreplicante es el RNA. En la década de 1980, Thomas Cech y Sidney Altman, cuando trabajaban con el organismo unicelular *Tetrahymena,* descubrieron una reacción celular que era catalizada no por una proteína, sino por una molécula de RNA pequeña. Debido a que esta molécula de RNA especial realizaba una función que previamente se creía sólo efectuaban las enzimas proteínicas, Cech y Altman decidieron darle el nombre de **ribozima** a la molécula catalítica de RNA.

En los años posteriores al descubrimiento de tales moléculas, los investigadores encontraron docenas de ribozimas que se presentan de forma natural y que catalizan una variedad de reacciones, incluyendo el corte de otras moléculas de RNA y el empalme de diferentes fragmentos de RNA. Las ribozimas se han encontrado también en la maquinaria de las células que fabrican proteínas, donde ayudan a catalizar la adherencia de moléculas de aminoácidos a las proteínas en crecimiento. Además, los investigadores lograron sintetizar diferentes ribozimas en el laboratorio, como aquellas que catalizan la replicación de moléculas pequeñas de RNA.

El descubrimiento de que las moléculas de RNA actúan como catalizadoras para diversas reacciones, incluida la replicación del RNA, sirve de apoyo a la hipótesis de que la vida surgió en un "mundo de RNA". De acuerdo con este punto de vista, la era actual de vida basada en el DNA estuvo precedida por otra donde el RNA servía como molécula genética portadora de información, y como enzima catalizadora de su propia duplicación. Este mundo de RNA pudo haber surgido después de cientos de millones de años de síntesis química prebiótica, durante los cuales los nucleótidos de RNA quizás hayan estado entre las moléculas sintetizadas. Después de haber logrado una concentración suficientemente alta, tal vez en partículas de arcilla, los nucleótidos probablemente se enlazaron para formar cadenas cortas de RNA.

Supongamos que, simplemente por azar, una de estas cadenas de RNA era una ribozima que podía catalizar la producción de sus propias copias. Tal vez esta primer ribozima autorreplicante no desempeñaba bien su trabajo y por ello produjo copias con muchos errores, los cuales se consideraron como las primeras mutaciones. Al igual que las mutaciones modernas, indudablemente la mayoría arruinó las funciones catalizadoras de las "moléculas hijas"; sin embargo, algunas cuantas pudieron haber mejorado. Estas mejorías establecieron las condiciones para la evolución de las moléculas de RNA, como variación de ribozimas con mayor rapidez y exactitud de duplicación, haciendo más copias de sí mismas y desplazando a las moléculas menos eficientes. La evolución molecular en el mundo del RNA prosiguió hasta que, por alguna serie de eventos todavía desconocidos, el RNA retrocedió gradualmente hasta su papel actual como intermediario entre el DNA y las enzimas proteínicas.

Las microesferas membranosas pudieron haber encerrado las ribozimas

Las moléculas autorreplicantes solas no constituyen la vida; tales moléculas deben estar encerradas dentro de alguna clase de membrana envolvente. Las precursoras de las primeras membranas biológicas quizá fueron estructuras sencillas, que se formaron de manera espontánea mediante procesos netamente físicos y mecánicos. Por ejemplo, los químicos han demostrado que si se agita el agua que contiene proteínas y lípidos, para simular las olas que rompían en las costas primitivas, las proteínas y los lípidos se combinarían para formar estructuras huecas llamadas *microesferas*, las cuales se asemejan a las células vivas en varios aspectos. Tienen un límite exterior bien definido que separa su contenido interno de su solución externa. Si la composición de la microesfera es correcta, se forma una "membrana" que se asemeja de manera notable a una membrana celular verdadera. En ciertas condiciones, las microesferas absorben material de la solución externa, crecen y se divididen.

Si sucediera que una microesfera rodea la ribozima correcta, se formaría algo parecido a una célula viva. La llamaríamos **protocélula**, cuya forma estructural sería como una célula, pero no como un ser vivo. En la protocélula las ribozimas y otras moléculas encerradas se protegerían de las ribozimas que vagan libremente en el caldo primigenio. Los nucleótidos y otras moléculas pequeñas quizá se hayan difundido a través de la membrana y utilizado para sintetizar nuevas ribozimas y otras moléculas complejas. Después de haber crecido lo suficiente, la microesfera se dividiría y unas cuantas copias de las ribozimas se incorporarían a cada microesfera hija. Si este proceso ocurriera, la trayectoria hacia la evolución de las primeras células estaría casi por terminar.

¿Hubo un momento específico en que la protocélula inanimada haya dado origen a un ser vivo? Probablemente no. Al igual que la mayoría de las transiciones evolutivas, el cambio de la protocélula a una célula viva fue un proceso continuo, sin límites bien definidos entre un estado y el siguiente.

Pero, ¿realmente sucedió todo esto?

Las circunstancias anteriores, aunque verosímiles y sustentadas por múltiples descubrimientos, no son en modo alguno irrefutables. Uno de los aspectos más impresionantes de la investigación sobre el origen de la vida es la gran diversidad de suposiciones, experimentos e hipótesis contradictorias. (La obra de Iris Fry *The Emergence of Life on Earth*, citada en la sección de "Para mayor información", al final de este capítulo, ofrece una idea de dichas controversias). Los investigadores no están de acuerdo sobre si la vida surgió en aguas estancadas, en el mar, en películas húmedas sobre la superficie de cristales de arcilla o en respiraderos extraordinariamente calientes de los mares profundos. Algunos sostienen

que la vida llegó del espacio a la Tierra. ¿Podemos obtener algunas conclusiones de las investigaciones realizadas hasta ahora? Nadie lo sabe con seguridad, pero haremos algunas observaciones.

Primera, los experimentos de Miller y otros demuestran que los aminoácidos, los nucleótidos y otras moléculas orgánicas, junto con las estructuras sencillas tipo membrana, se pudieron haber formado de manera abundante en la Tierra primitiva. Segunda, la evolución química tuvo largos periodos y disposición de inmensas áreas terrestres. Con el tiempo suficiente y un acervo grande de moléculas reactivas, muchas veces incluso los sucesos extremadamente raros ocurren. De modo que aunque una evolución prebiótica haya generado sólo moléculas sencillas, los catalizadores primitivos no eran muy eficientes y las primeras membranas eran también muy simples, las vastas magnitudes de tiempo y de espacio disponibles habrían aumentado la probabilidad de dar pasos pequeños en la trayectoria del caldo primigenio a la célula viva.

La mayoría de los biólogos aceptan que el origen de la vida fue probablemente una consecuencia inevitable de la acción de las leyes naturales. Debemos hacer énfasis, sin embargo, en que esta propuesta no puede comprobarse de manera definitiva. El origen de la vida no dejó ningún registro, y los investigadores que exploran este misterio proceden sólo desarrollando un escenario hipotético y luego realizando investigaciones en el laboratorio, para determinar si los pasos dados son química y biológicamente posibles.

17.2 ¿CÓMO ERAN LOS PRIMEROS ORGANISMOS?

Cuando se formó la Tierra, hace unos 4500 millones de años, estaba sumamente caliente (FIGURA 17-3). Una multitud de meteoritos chocaron contra nuestro planeta en formación y la energía cinética de esas rocas extraterrestres se convirtió en calor por el impacto; se liberó aún más calor por el decaimiento de los átomos radiactivos. La roca que formaba la Tierra se fundió y los elementos más pesados, como el hierro y el níquel, se hundieron hacia el centro del planeta, donde permanecen fundidos en la actualidad. Debió haber tomado cientos de millones de años para que la Tierra se enfriara lo suficiente como para permitir la existencia de agua en su estado líquido. No obstante, parece que la vida surgió justamente poco tiempo después de que había disponible agua en estado líquido.

Los organismos fósiles más antiguos que se han encontrado hasta ahora están incrustados en rocas que tienen aproximadamente 3500 millones de años de antigüedad. (Ésta se determinó empleando la técnica de fechado radiométrico; véase "Investigación científica: ¿Cómo sabemos qué tan antiguo es un fósil?"). Los rastros químicos de las rocas más antiguas sugieren a algunos paleontólogos que la vida es aún más arcaica: quizá tan antigua como unos 3900 millones de años.

El periodo en que comenzó la vida se conoce como la era precámbrica, cuyo nombre fue dado por geólogos y paleontólogos, quienes desarrollaron un sistema para asignar nombres por jerarquía a eras, periodos y épocas, para delinear la inmensa magnitud del tiempo geológico (tabla 17-1).

Los primeros organismos fueron procariotas anaerobios

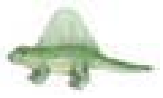
Las primeras células que surgieron en los océanos de la Tierra fueron los **procariotas**, cuyo material genético no estaba contenido dentro de un núcleo separado del resto de la célula. Estas células probablemente obtenían nutrimentos y energía al absorber moléculas orgánicas de su ambiente. Como no había gas oxígeno en la atmósfera, las células debieron metabolizar las moléculas orgánicas de forma anaeróbica. Recuerda del capítulo 8 que el metabolismo anaeróbico produce sólo pequeñas cantidades de energía.

Así, las primeras células eran bacterias anaeróbicas primitivas. A medida que se fueron multiplicando esas bacterias, con el tiempo debieron acabar con las moléculas orgánicas producidas por reacciones químicas prebióticas. Las moléculas más sencillas, como las del dióxido de carbono, y agua, que debieron de abundar mucho, como también la energía en forma de luz solar. Entonces, lo que hacía falta no eran los materiales ni la energía misma, sino las moléculas energéticas, es

FIGURA 17-3 Tierra primitiva
La vida se inició en un planeta caracterizado por abundante actividad volcánica, frecuentes tormentas eléctricas, impactos constantes de meteoritos y una atmósfera carente de gas oxígeno.

Tabla 17-1 Historia de la vida en la Tierra

Era	Periodo	Época	Hace millones de años*	Sucesos principales
Cenozoica	Cuaternario	Reciente	0.01–presente	Evolución del género *Homo*; glaciaciones frecuentes en el Hemisferio Norte; extinción de muchos mamíferos gigantes.
		Pleistoceno	1.8–0.01	
	Terciario	Plioceno	5–1.8	Prosperidad generalizada de aves, mamíferos, insectos y plantas con flores; desplazamiento de continentes a sus posiciones actuales; clima benigno al inicio del periodo, con extensa formación de montañas y enfriamiento al final.
		Mioceno	23–5	
		Oligoceno	38–23	
		Eoceno	54–38	
		Paleoceno	65–54	
Mesozoica	Cretácico		146–65	Surgen las plantas con flores y llegan a ser dominantes; extinciones masivas de vida marina y alguna terrestre, incluidos los últimos dinosaurios; los continentes modernos quedan bien separados.
	Jurásico		208–146	Predominio de dinosaurios y coníferas; primeras aves; los continentes se separan parcialmente.
	Triásico		245-208	Primeros mamíferos y dinosaurios; los bosques de gimnospermas y helechos arbóreos; inicio de la separación de la Pangea.
Paleozoica	Pérmico		286–245	Extinciones marinas masivas, incluidos los últimos trilobites; auge de los reptiles y decadencia de los anfibios; unión de continentes en una sola masa de tierra, la Pangea.
	Carbonífero		360–286	Bosques pantanosos de helechos arbóreos y licopodios; primeras coníferas; predomino de los anfibios; numerosos insectos, primeros reptiles.
	Devónico		410–360	Los peces y trilobites prosperan en el mar; primeros anfibios e insectos; primeras semillas y polen.
	Silúrico		440–410	Muchos peces, trilobites y moluscos en el mar; primeras plantas vasculares; las plantas y los artrópodos invaden la tierra.
	Ordovícico		505–440	Los invertebrados, especialmente los artrópodos y los moluscos, dominan los mares; primeros hongos.
	Cámbrico		544–505	Prosperan las algas marinas primitivas; origen de la mayoría de los tipos de invertebrados marinos; primeros peces.
Precámbrica			Aprox. 1000	Primeros animales (invertebrados marinos de cuerpo blando).
			1200	Primeros organismos multicelulares.
			2000	Primeros eucariotas.
			2200	Acumulación de oxígeno libre en la atmósfera.
			3500	Origen de la fotosíntesis (en cianobacterias).
			3900–3500	Primeras células vivientes (procariotas).
			4000–3900	Aparición de las primeras rocas en la Tierra.
			4600	Origen del sistema solar y de la Tierra.



decir, las moléculas donde la energía se almacenara en enlaces químicos.

Algunos organismos adquirieron la capacidad de captar la energía solar

Con paso del tiempo, algunas células adquirieron la capacidad para emplear la energía de la luz solar, para impulsar la síntesis de moléculas complejas de alta energía a partir de moléculas más sencillas; en otras palabras, surgió la fotosíntesis, la cual requiere de una fuente de hidrógeno; las bacterias fotosintéticas más primitivas probablemente utilizaron sulfuro de hidrógeno disuelto en agua para ese propósito (como lo hacen actualmente las bacterias fotosintéticas púrpuras). A final de cuentas, sin embargo, tuvo que disminuir el abastecimiento terrestre de sulfuro de hidrógeno (que se produce principalmente por los volcanes). La escasez de sulfuro de hidrógeno preparó el escenario para la evolución de las bacterias fotosintéticas que fueron capaces de usar la fuente de hidrógeno más abundante del planeta: el agua (H_2O).

La fotosíntesis aumentó la cantidad de oxígeno en la atmósfera

La fotosíntesis basada en el agua convierte a ésta y al dióxido de carbono en moléculas energéticas de azúcar, liberando así el oxígeno como subproducto. La aparición de este nuevo método para captar energía introdujo, por primera vez, cantidades importantes de oxígeno libre en la atmósfera. Al principio el nuevo oxígeno liberado se consumió rápidamente por las reacciones con otras moléculas en la atmósfera y la corteza terrestre (o capa superficial). Un átomo reactivo especialmente común en la corteza era el hierro y mucho del nuevo oxígeno se combinó con los átomos de hierro para formar enormes depósitos de óxido de hierro (conocido también como herrumbre).

Después de que todo el hierro accesible se convirtió en herrumbre, empezó a incrementarse la concentración de gas oxígeno en la atmósfera. El análisis químico de las rocas sugiere que cantidades significativas de oxígeno aparecieron primero en la atmósfera, hace aproximadamente 2200 millones de años, producidas por las bacterias que probablemente eran muy similares a las cianobacterias modernas. (Indudablemente en la actualidad respiras algunas moléculas de oxígeno que fueron expelidas hace unos 2000 millones de años por alguna de esas cianobacterias primitivas). Los niveles de oxígeno atmosférico se incrementaron paulatinamente hasta que alcanzaron un nivel estable hace cerca de 1500 millones de años. Desde ese tiempo, la proporción de oxígeno en la atmósfera ha sido casi constante, ya que la cantidad de oxígeno liberado por la fotosíntesis en todo el mundo se compensa exactamente con la cantidad que se consume en la respiración aeróbica.

El metabolismo aeróbico surgió como respuesta a la crisis del oxígeno

El oxígeno es potencialmente muy peligroso para los seres vivos, ya que reacciona con las moléculas orgánicas y las destruye. Muchas de las bacterias anaeróbicas actuales mueren cuando se exponen al oxígeno, el cual resulta un veneno mortal para ellas. La acumulación de oxígeno en la atmósfera de la Tierra primitiva probablemente exterminó a muchos organismos y fomentó la evolución de los mecanismos celulares para contrarrestar la toxicidad del oxígeno. Esta crisis de la evolución de la vida también creó la presión ambiental para el siguiente gran adelanto en la era de los microbios: la capacidad para utilizar el oxígeno en el metabolismo, la cual no solamente brinda una defensa contra la acción química del oxígeno, sino que realmente canaliza el poder destructor del oxígeno a través de la respiración aeróbica, para generar energía útil para la célula. Debido a que la cantidad de energía disponible para la célula se incrementa considerablemente cuando el oxígeno se usa para metabolizar las moléculas de los alimentos, las células aeróbicas tenían una importante ventaja selectiva.

Algunos organismos adquirieron organelos encerrados en membranas

Multitudes de bacterias ofrecerían una fuente rica de alimento para cualquier organismo que pudiera comérselas. No hay fósiles de las primeras células depredadoras que hayan recorrido los océanos; no obstante, los paleobiólogos especulan que si alguna vez apareció una adecuada población de presas (como estas bacterias), la depredación pudo haber evolucionado rápidamente. De acuerdo con la hipótesis de mayor aceptación, estos depredadores primitivos eran procariotas que evolucionaron hasta llegar a ser más grandes que las bacterias comunes. Además, habían perdido la rígida pared celular que rodea a la mayor parte de las células bacterianas, de modo que su membrana plasmática flexible estaba en contacto con el ambiente. Así, las células depredadoras eran capaces de envolver a las bacterias más pequeñas en una bolsa de membrana plegable y, de esa forma, se tragaban a toda la bacteria a modo de presa.

Estas depredadoras primitivas tal vez no eran capaces de realizar la fotosíntesis ni el metabolismo aeróbico. Aunque podían captar partículas de alimento grandes, es decir, bacterias, las metabolizaban de manera poco eficiente. Aproximadamente hace 1700 millones de años, un depredador probablemente dio origen a la primera célula eucariótica.

Las membranas internas de las eucariotas pudieron haber surgido a través del plegado hacia dentro de la membrana plasmática

Como sabes, las células **eucarióticas** difieren de las células procarióticas en que tienen un sistema complicado de membranas internas, incluyendo el núcleo que contiene su material genético. Quizás estas membranas internas hayan surgido originalmente a través del plegado hacia dentro de la membrana celular de un depredador unicelular. Si como sucede con la mayoría de las bacterias actuales, el DNA de los ancestros de las eucariotas estaba adherido al interior de su membrana celular, un pliegue de la membrana cerca del sitio de adherencia del DNA se estranguló y se convirtió en el precursor del núcleo celular.

Además del núcleo, otras estructuras eucarióticas fundamentales incluyen los organelos empleados para el metabolismo energético: las mitocondrias y (en plantas y algas) los cloroplastos. ¿Cómo evolucionaron estos organelos?

Las mitocondrias y los cloroplastos pudieron haber surgido a partir de las bacterias englobadas (fagocitadas)

La **hipótesis endosimbiótica** propone que las células eucarióticas primitivas adquirieron los precursores de las mitocondrias y los cloroplastos al fagocitar a ciertos tipos de bacterias.

INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA ¿Cómo sabemos qué tan antiguo es un fósil?

Los primeros geólogos podían fechar las capas de roca y los fósiles que había en ellas sólo de un modo *relativo*: los fósiles encontrados en las capas más profundas de la roca por lo común eran más antiguos que los hallados en las capas más superficiales. Con el descubrimiento de la radiactividad se hizo posible determinar las fechas *absolutas*, dentro de ciertos límites de incertidumbre. Los núcleos de los elementos radiactivos se descomponen o se desintegran espontáneamente y originan otros elementos. Por ejemplo, el carbono 14 (que generalmente se escribe como ^{14}C) se descompone al emitir un electrón para transformarse en nitrógeno 14 (^{14}N). Cada elemento radiactivo se desintegra con una rapidez que es independiente de la temperatura, de la presión o del compuesto químico del cual forma parte. El tiempo necesario para que decaigan la mitad de los núcleos del elemento radiactivo a esa rapidez característica se llama *vida media*, la cual, por ejemplo, en el caso del ^{14}C es de 5730 años.

¿Cómo se utilizan los elementos radiactivos para determinar la edad de las rocas? Si conocemos la rapidez de desintegración y medimos la proporción de los núcleos desintegrados respecto a los núcleos no desintegrados, calcularemos el tiempo transcurrido desde que esos elementos radiactivos quedaron atrapados en la roca. Este procedimiento se llama *fechado radiométrico*. Una técnica de fechado particularmente sencilla mide la desintegración del potasio 40 (^{40}K), cuya vida promedio es de cerca de 1250 millones de años, y que se transforma en argón 40 (^{40}Ar). El potasio es un elemento muy reactivo que comúnmente se encuentra en las rocas volcánicas, como el granito y el basalto; sin embargo, el argón es un gas que no reacciona. Supongamos que un volcán hace erupción y lanza un gran flujo de lava que cubre el terreno contiguo. Como el ^{40}Ar es un gas, se desprende de la lava derretida, de manera que cuando se va enfriando y se solidifica, la roca que se forma ya no contendrá gas ^{40}Ar. Mientras tanto, cualquier ^{40}K presente en la lava endurecida se desintegrará a ^{40}Ar, con la mitad del ^{40}K desintegrándose cada 1250 millones de años. Este gas ^{40}Ar queda atrapado en la roca. El geólogo puede tomar una muestra de roca y determinar la proporción de ^{40}K y de ^{40}Ar (**FIGURA E17-1**). Si el análisis indica que hay cantidades iguales de esos dos elementos, el geólogo concluirá que la lava se solidificó hace 1250 millones de años. Si se hace esto con mucho cuidado, tales cálculos son bastante confiables, y si se encuentra un fósil debajo de la lava fechada, digamos en 500 millones de años, entonces sabremos que el fósil tiene al menos esa antigüedad.

Conforme se descomponen algunos elementos radiactivos, éstos pueden darnos un estimado de la edad del sistema solar. El análisis del uranio, el cual se desintegra a plomo, ha demostrado que los meteoritos más antiguos y las rocas lunares recabadas por los astronautas tienen aproximadamente 4600 millones de años.

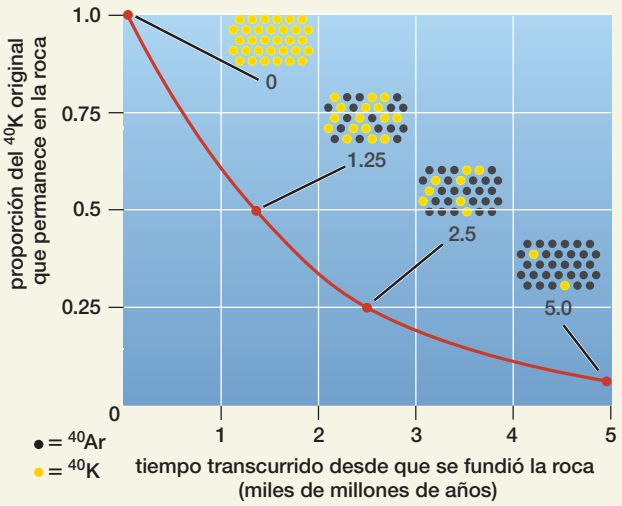


FIGURA E17-1 Relación entre el tiempo y la desintegración del ^{40}K radiactivo a ^{40}Ar

EJERCICIO El uranio 235 decae a plomo 207 con una vida media de 713 millones de años. Si analizas una roca y encuentras que contiene uranio 235 y plomo 207 en una proporción de 3:1, ¿qué tan antigua es la roca?

Estas células y las bacterias atrapadas en ellas (*endo* significa "dentro") entraron gradualmente en una relación *simbiótica*, es decir, una asociación estrecha entre diferente tipos de organismos durante un tiempo prolongado. ¿Cómo pudo suceder esto?

Supongamos que una célula depredadora anaerobia atrapó a una bacteria aerobia para alimentarse, como lo hace a menudo; pero por alguna razón no la pudo digerir. La bacteria aerobia permaneció viva y en buen estado. De hecho, está mejor que nunca porque el citoplasma de su depredadora-huésped estaba atiborrado de moléculas de alimento a medio digerir: los residuos del metabolismo anaeróbico. La bacteria aerobia absorbió estas moléculas y usó el oxígeno para metabolizarlas, por lo tanto, obtuvo enormes cantidades de energía. Tan abundantes fueron los recursos alimentarios del microorganismo aerobio, y tan copiosa la producción de energía, que probablemente el aerobio tuvo fugas de energía, quizá como ATP o moléculas similares, hacia el citoplasma de su huésped. La célula depredadora anaerobia, junto con su bacteria simbiótica, puede metabolizar ahora el alimento en forma aeróbica, obteniendo así una gran ventaja sobre otras células anaerobias, y deja un gran número de descendientes. Con el paso del tiempo, las bacterias endosimbióticas pierden su capacidad para vivir de manera independiente de su huésped, y entonces nace la mitocondria (**FIGURA 17-4**, ① y ②).

Una de estas nuevas asociaciones celulares exitosas debió haber logrado una segunda proeza: atrapar a una cianobacteria fotosintética pero, de manera similar, sin digerir a su presa. La cianobacteria floreció en su nuevo huésped y evolucionó gradualmente hacia el primer cloroplasto (**FIGURA 17-4**, ③ y ④). Quizás otros organelos eucarióticos se hayan originado también por endosimbiosis. Muchos biólogos creen que cilios, flagelos, centriolos y microtúbulos pudieron haber evolucionado por la simbiosis entre una bacteria del tipo espirilo (que se asemeja a un sacacorchos largo) y una célula eucariótica primitiva.

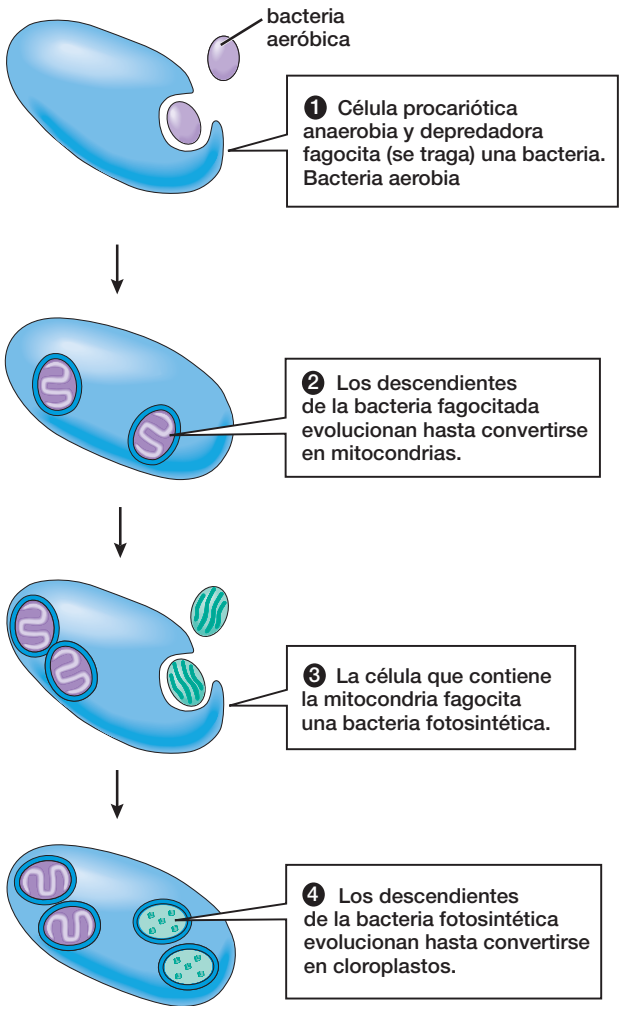

bacteria aeróbica
❶ Célula procariótica anaerobia y depredadora fagocita (se traga) una bacteria. Bacteria aerobia
❷ Los descendientes de la bacteria fagocitada evolucionan hasta convertirse en mitocondrias.
❸ La célula que contiene la mitocondria fagocita una bacteria fotosintética.
❹ Los descendientes de la bacteria fotosintética evolucionan hasta convertirse en cloroplastos.

FIGURA 17-4 Origen probable de mitocondrias y cloroplastos en células eucarióticas
PREGUNTA: Los científicos han identificado una bacteria viva que se creía era descendiente del endiosimbionte que dio origen a las mitocondrias. ¿Esperarías que la secuencia de DNA de esta bacteria moderna fuera muy parecida a la secuencia de DNA de un cloroplasto vegetal, del núcleo de una célula animal o de la mitocondria de una planta?

Es fuerte la evidencia de la hipótesis endosimbiótica

Varios tipos de evidencias apoyan la hipótesis endosimbiótica. Algunas muy precisas y específicas son las múltiples características bioquímicas distintivas que comparten los organelos eucarióticos y las bacterias vivas. Además, las mitocondrias, los cloroplastos y los centriolos contienen cada uno su propia dotación diminuta de DNA, que muchos investigadores consideran como un residuo del DNA que contenía originalmente la bacteria fagocitada.

Otro tipo de apoyo proviene de los *intermediarios vivientes*, es decir, de organismos que están vivos actualmente y que son parecidos a los ancestros hipotéticos, y que ayudan a demostrar que es factible una vía evolutiva propuesta. Por ejemplo, la amiba *Pelomyxa palustris* carece de mitocondrias, pero aloja a una población permanente de bacterias aerobias que desempeñan una función muy similar. De igual manera, una variedad de corales, algunas almejas, unos pocos caracoles y al

FIGURA 17-5 Simbiosis intracelular moderna
Los antepasados de los cloroplastos de las células vegetales modernas tal vez fueron semejantes a la *Chlorella*, el alga verde unicelular fotosintética que vive en simbiosis dentro del citoplasma del *Paramecium* que se muestra aquí.

menos una especie del *Paramecium* albergan una colección permanente de algas fotosintéticas en sus células (**FIGURA 17-5**). Estos ejemplos de células modernas que alojan a bacterias endosimbiotas sugieren que no tenemos razón alguna para dudar de que asociaciones simbióticas similares pudieron haber ocurrido hace casi 2000 millones de años y que originaron las primeras células eucarióticas.

17.3 ¿CÓMO ERAN LOS PRIMEROS ORGANISMOS MULTICELULARES?

Una vez que evolucionó la depredación, el hecho de tener mayor tamaño se convirtió en una ventaja. En los ambientes marinos a donde se restringía la vida, una célula más grande podía con facilidad fagocitar a una pequeña, y también era más difícil que otras células depredadoras las ingirieran. Por lo general, los organismos grandes se mueven más rápido que los pequeños, y tienen más éxito tanto en la depredación como en la huida. No obstante, las enormes células individuales tienen problemas. El oxígeno y los nutrimentos que entran en la célula, así como los productos residuales que salen, deben difundirse a través de la membrana plasmática. Cuanto más grande sea una célula, habrá menos disponibilidad de la membrana superficial por unidad de volumen de citoplasma.

Hay únicamente dos formas en que sobrevive un organismo mayor de un milímetro de diámetro. Primera, puede tener una rapidez metabólica baja, de manera que no necesite mucho oxígeno ni que produzca mucho dióxido de carbono. La estrategia parece que funciona para ciertas algas unicelulares muy grandes. Por otro lado, un organismo puede ser multicelular, es decir, estar compuesto de muchas células pequeñas empaquetadas en un cuerpo unificado más grande.

Algunas algas se volvieron multicelulares

Los fósiles más antiguos de organismos multicelulares datan de hace cerca de 1200 millones de años e incluyen huellas de las primeras algas multicelulares, las cuales surgieron de las células eucarióticas unicelulares que contenían cloroplastos. Los organismos multicelulares proporcionaron, cuando menos, dos ventajas a estas algas marinas. En primer lugar, los depredadores unicelulares tendrían dificultades para fagocitar las algas grandes multicelulares. Y en segundo lugar, la especialización celular habría brindado el potencial necesario para establecerse en un solo sitio, en las aguas brillantemente iluminadas del litoral, mediante estructuras en forma de raíces que se hundían en la arena o se afianzabas a las rocas; en tanto que las estructuras en forma de hojas flotaban más arriba expuestas a la luz solar. Las algas verdes, cafés y rojas que recubren nuestras costas actuales —algunas, como las algas pardas o cafés, de más de 66 metros de longitud—, son descendientes de esas algas multicelulares primitivas.

La diversidad animal surgió en la era precámbrica

Además de las algas fósiles, las rocas de mil millones de años de antigüedad han producido vestigios fósiles a partir de huellas de animales y madrigueras. Esto evidencia la vida animal primitiva; sin embargo, los fósiles de cuerpos de animales aparecieron primero en las rocas del precámbrico de hace entre 610 y 544 millones de años. Algunos de estos antiguos invertebrados (animales que carecen de espina dorsal) son bastante diferentes en apariencia de cualesquiera otros animales que aparecen en capas posteriores de fósiles, y pueden representar los tipos de animales que no tuvieron descendientes. Otros fósiles en estas capas rocosas, sin embargo, parecen ser los ancestros de los animales actuales. Las esponjas primitivas y las medusas aparecen en las capas más antiguas, seguidas posteriormente por los ancestros de gusanos, moluscos y artrópodos.

La gama completa de los animales invertebrados modernos, sin embargo, no aparece en el registro de fósiles, sino hasta el periodo cámbrico, marcando así el comienzo de la era paleozoica, hace alrededor de 544 millones de años. (La frase de "registro de fósiles" es una referencia breve de la colección completa de todas las evidencias de fósiles que se han encontrado hasta ahora). Estos fósiles del cámbrico revelan una radiación adaptativa (véase el capítulo 16) que ya había producido un arreglo diverso de complejos planes corporales. Casi todos los principales grupos de animales que habitan la Tierra actualmente ya estaban presentes en el cámbrico temprano. El surgimiento repentino de tantos tipos diferentes de animales indica que la historia evolutiva inicial, que produjo tan impresionante gama de formas animales diferentes, no se conserva en el registro de fósiles.

Parcialmente la diversificación temprana de los animales probablemente estuvo impulsada por la aparición de estilos de vida de los depredadores. La coevolución del depredador y la presa llevó a la evolución de nuevas características en muchas clases de animales. Por el periodo silúrico (hace 440 a 410 millones de años), los trilobites de coraza que se deslizaban sobre el cieno eran la presa de los amonites y del nautilo septado, los cuales aún sobreviven en una forma que casi no ha sufrido ningún cambio en las aguas profundas del Océano Pacífico ( ).

Muchos animales de la era paleozoica eran más móviles que sus predecesores evolutivos. Los depredadores tienen una ventaja porque son capaces de desplazarse en espacios amplios en busca de presas adecuadas; mientras que la capacidad de huir con rapidez es una ventaja de la presa. La evolución de la locomoción eficiente en ocasiones estaba asociada con la evolución de una mayor capacidad sensitiva y sistemas nerviosos más complejos. Los sentidos para percibir el tacto, las sustancias químicas y la luz se desarrollaron bastante, junto con un sistema nervioso capaz de manejar la información sensorial y dirigir las conductas apropiadas.

Hace unos 530 millones de años, un grupo de animales —los peces— desarrollaron una nueva forma para sostener el cuerpo: un esqueleto interior. Estos peces primitivos pasaban inadvertidos en la comunidad oceánica; pero hace unos 400 millones de años, los peces ya formaban un grupo diverso y prominente. En general, los peces probaron ser más veloces que los invertebrados, con sentidos más agudos y cerebros más grandes. Con el paso del tiempo se convirtieron en los depredadores dominantes en el mar abierto.

17.4 ¿CÓMO LLEGÓ LA VIDA A LA TIERRA FIRME?

Una de las tramas secundarias más emocionantes del largo recuento de la historia de la vida es la invasión de la tierra por la vida, después de más de 3000 millones de años de una existencia estrictamente acuática. Al pasar a la tierra firme, los organismos tuvieron que vencer muchos obstáculos. Gracias a la flotación, la vida en el mar brinda apoyo contra la gravedad; no obstante, en tierra un organismo debe soportar su peso contra la aplastante fuerza de la gravedad. El mar ofrece un acceso inmediato al agua dadora de vida; pero un organismo terrestre debe encontrar el agua apropiada. Las plantas y los animales que habitan en el mar se reproducen mediante espermatozoides u óvulos móviles, o ambos, los cuales nadan unos hacia otros; sin embargo, quienes habitan en tierra firme tienen que proteger sus gametos de la resequedad.

A pesar de los obstáculos para la vida en la tierra, los inmensos espacios vacíos de la masa terrestre paleozoica representaban una enorme oportunidad evolutiva. Las ventajas potenciales de la vida terrestre eran especialmente grandes para las plantas. El agua absorbe la luz en gran medida, por lo que incluso en las aguas transparentes la fotosíntesis se limita a unos cuantos cientos de metros por debajo de la superficie, y habitualmente a profundidades mucho menores. Afuera del agua, el Sol brilla en todo su esplendor y permite una rápida fotosíntesis. Además, los suelos terrestres son ricos en depósitos de nutrimentos; en tanto que el agua de mar suele ser pobre en algunos de éstos, en particular en nitrógeno y fósforo. Finalmente, en el mar paleozoico abundaban los animales herbívoros; en cambio, la tierra firme carecía de vida animal. Las primeras plantas que colonizaron la Tierra dispondrían de abundante luz solar y de fuentes de nutrimentos intactas, y estarían a salvo de los depredadores.

Algunas plantas se adaptaron a la vida en tierra firme

En los suelos húmedos situados a la orilla del agua comenzaron a crecer unas cuantas algas verdes pequeñas que aprovechaban la luz solar y los nutrimentos. No tenían cuerpos

a)

b)

c)

d)

FIGURA 17-6 Diversidad de la vida en los océanos durante el periodo silúrico
a) Características de la vida en los océanos durante el periodo silúrico, hace 440 a 410 millones de años. Entre los fósiles más comunes de ese periodo están ***b)*** los trilobites y sus depredadores los nautiloides y ***c)*** los amonites. Este ***d)*** *Nautilus* viviente es muy parecido en su estructura a los nautiloides del silúrico, porque demuestra que puede existir un exitoso plan corporal prácticamente sin cambio durante cientos de millones de años.

grandes que sostener contra la fuerza de la gravedad, y dado que vivían precisamente en la película de agua que recubría el suelo, la obtenían con facilidad. Hace alrededor de 475 millones de años, algunas de estas algas dieron origen a las primeras plantas terrestres multicelulares. Inicialmente, con formas simples que crecían poco, las plantas terrestres encontraron rápidamente soluciones a dos de las principales dificultades que ofrece la vida vegetal en tierra firme: obtener y conservar el agua, y mantenerse erguidas a pesar de la gravedad y de los vientos. Los revestimientos impermeables de las partes salientes redujeron la pérdida de agua por evaporación, y las estructuras semejantes a raíces penetraban en el suelo para extraer agua y minerales. Las células especializadas formaron unos tubos, llamados tejidos vasculares, para transportar agua de las raíces a las hojas. Unas paredes más gruesas en torno a ciertas células permitieron a los tallos mantenerse erguidos.

Las plantas terrestres primitivas conservaron sus espermatozoides capaces de nadar y necesitaban agua para reproducirse

La reproducción fuera del agua planteaba varios desafíos. Al igual que los animales, las plantas producen espermatozoides y óvulos, los cuales necesitaban reunirse para llevar a cabo la reproducción. Las primeras plantas terrestres tenían espermatozoides capaces de nadar, por lo que cabe suponer que eran parecidas a algunas de las algas marinas modernas (algunas tienen también óvulos que nadan). En consecuencia, las primeras plantas habitaban sólo en los pantanos y ciénagas, donde los espermatozoides y los óvulos podían liberarse en el agua, o en zonas con abundante precipitación pluvial, donde ocasionalmente el suelo quedaba cubierto de agua. Más tarde, las plantas con espermatozoides que sabían nadar prosperaron durante periodos en que el clima era cálido y húmedo. Por ejemplo, el periodo carbonífero (hace unos 360 a 286 millones de años) se caracterizó por los inmensos bosques de helechos arbóreos gigantes y licopodios (**FIGURA 17-7**). El carbón mineral que extraemos actualmente de las minas proviene de los restos fosilizados de esos bosques.

Las plantas con semilla encapsularon a los espermatozoides en granos de polen

Entretanto, algunas plantas que habitaban en regiones más secas habían perfeccionado estrategias reproductivas que ya no dependían de la disponibilidad de agua. Los óvulos de estas plantas permanecían en la planta progenitora, y los esper-

FIGURA 17-7 El bosque pantanoso del periodo carbonífero
En esta reconstrucción artística, las plantas parecidas a árboles son helechos arbóreos y licopodios gigantes, la mayor parte de los cuales se extinguieron. PREGUNTA: ¿Por qué los helechos y los licopodios actuales son tan pequeños en comparación con sus enormes antepasados?

matozoides estaban encerrados en granos de polen resistentes a la sequía, los cuales eran arrastrados por el viento de una planta a otra. Cuando los granos de polen se depositaban cerca de un óvulo, liberaban gametos masculinos directamente en el tejido vivo, y así eliminaban la necesidad de disponer de una película superficial de agua. El óvulo fecundado permanecía en la planta progenitora, donde se desarrollaba en el interior de una semilla que brindaba protección y nutrimentos al embrión que crecía en su interior.

Las primeras plantas con semilla aparecieron hacia finales del periodo devónico (hace 375 millones de años) y producían sus semillas a lo largo de las ramas, sin estructuras especializadas para sostenerlas. Para mediados del carbonífero, sin embargo, ya había surgido una nueva clase de plantas con semilla. Estas plantas, llamadas **coníferas**, brindaban protección a sus semillas en desarrollo dentro de conos. Las coníferas, que no dependían del agua para reproducirse, prosperaron y se difundieron durante el periodo pérmico (hace 286 a 245 millones de años), cuando las montañas se elevaron, los pantanos se desecaron y el clima se volvió mucho más seco. No obstante, la buena fortuna de las coníferas no pudo ser compartida por los helechos arbóreos ni por los licopodios gigantes, los cuales, con sus espermatozoides nadadores, se extinguieron en su mayoría.

Las plantas con flores atraían a los animales para que transportaran su polen

Hace alrededor de 140 millones de años, durante el periodo cretácico, aparecieron las plantas con flores, las cuales evolucionaron a partir de un grupo de plantas similares a las coníferas. Muchas plantas con flores son polinizadas por los insectos y otros animales, y esta forma de polinización parece que les confirió una ventaja evolutiva. La polinización de las flores por los animales puede ser mucho más eficaz que la polinización por el viento. Las plantas que son polinizadas por el viento deben producir una enorme cantidad de polen, porque la mayoría de los granos de polen no llegan a su objetivo. Las plantas con flores adquirieron también otras ventajas, incluyendo una reproducción más rápida y, en algunos casos, un crecimiento también mucho más acelerado. En la actualidad, las plantas con flores dominan la Tierra, con excepción de las regiones septentrionales frías, donde aún prevalecen las coníferas.

Algunos animales se adaptaron a la vida en tierra firme

Poco después de que evolucionaron las plantas terrestres, y que constituyeran fuentes potenciales de alimento para otros organismos, algunos animales emergieron del mar. Los primeros que se establecieron en tierra fueron los **artrópodos** (el grupo que actualmente incluye insectos, arañas, escorpiones, ciempiés y cangrejos). ¿Por qué se llaman artrópodos? La respuesta parece ser que ya poseían ciertas estructuras que, por simple azar, eran idóneas para la vida terrestre. La más destacada de tales estructuras era un esqueleto externo, o **exoesqueleto**, es decir, una cubierta dura que rodea el cuerpo, como el caparazón de una langosta o de un cangrejo. El exoesqueleto es impermeable y muy resistente como para sostener a un animal pequeño contra la fuerza de la gravedad.

Durante millones de años, los artrópodos tuvieron toda la Tierra y las plantas a su disposición y, a lo largo de varias decenas de millones más, fueron los animales dominantes. Las libélulas con una envergadura de 70 centímetros (28 pulgadas) volaban entre los helechos arbóreos del carbonífero; mientras los milpiés de 2 metros de longitud (6.5 pies) se abrían paso a mordidas por el pantanoso suelo de los bosques. Con el tiempo, no obstante, el espléndido aislamiento de los artrópodos llegó a su fin.

Los anfibios evolucionaron a partir de peces con aleta lobular

Hace aproximadamente 400 millones de años, apareció un grupo de peces silúricos conocidos como de **aleta lobular**, probablemente en el agua dulce. Estos peces tenían dos importantes características que más adelante permitirían a sus descendientes colonizar la tierra: **1.** aletas carnosas y fuertes con las que se arrastraban en el fondo de las aguas tranquilas y poco profundas, y **2.** una bolsa que salía del tracto digestivo que podía llenarse aire, a modo de un pulmón primitivo. Un grupo de estos peces colonizó los estanques y arroyos poco profundos, los cuales disminuían su tamaño durante las sequías y cuyas aguas solían perder bastante oxígeno. No obstante, al inhalar aire hacia los pulmones estos peces lograban obtener oxígeno. Algunos comenzaron a utilizar las aletas para arrastrarse de un estanque a otro en busca de alguna presa o de agua, tal como lo hacen algunos peces en la actualidad (

FIGURA 17-8 Pez que camina en tierra firme
Algunos peces modernos, como el pez saltarín del fango, caminan en tierra firme. Al igual que los primitivos peces con aleta lobular que dieron origen a los anfibios, los saltarines del fango utilizan sus fuertes aletas pectorales para desplazarse por los lugares secos de sus hábitat pantanosos. PREGUNTA: ¿La capacidad de este pez para caminar en tierra firme constituye evidencia de que los peces con aleta lobular son los antepasados de los anfibios?

Las ventajas de alimentarse en tierra firme y de moverse de estanque a estanque favoreció la evolución de un grupo de animales que podían permanecer fuera del agua durante periodos más largos y que fueran capaces de moverse con seguridad sobre la tierra firme.

Al mejorar los pulmones y patas, los peces con aleta lobular evolucionaron a **anfibios**, y aparecieron por primera vez en el registro de fósiles hace aproximadamente 350 millones de años. Para los anfibios los bosques pantanosos del carbonífero fueron un ambiente paradisiaco: no había depredadores, las presas abundaban y el clima era cálido y húmedo. Al igual que los insectos y milpiés, algunos anfibios alcanzaron dimensiones gigantescas, como las salamandras, con más de 3 metros (10 pies) de longitud.

A pesar de su éxito, los primeros anfibios no estaban aún totalmente adaptados a la vida terrestre. Sus pulmones eran simples bolsas con escasa área superficial, por lo que debían obtener algo de oxígeno a través de la piel; por lo tanto, su piel tenía que mantenerse húmeda, lo cual los restringía a un hábitat pantanoso donde no podían estar secos. Además, los espermatozoides y los óvulos de los anfibios no sobrevivían en entornos secos, por lo que debían depositarse en ambientes acuosos. Así, aunque los anfibios se desplazaban por tierra, no podían alejarse demasiado de la orilla del agua. Al igual que los helechos arbóreos y los licopodios, los anfibios menguaron cuando el clima se volvió seco a inicios del periodo pérmico, hace aproximadamente 286 millones de años.

Los reptiles evolucionaron a partir de los anfibios

Al mismo tiempo que las coníferas evolucionaban a orillas de los bosques pantanosos, también lo hacía un grupo de anfibios con adaptaciones para condiciones más secas. A la postre de estos anfibios surgieron los **reptiles**, que lograron tres adaptaciones importantes para vivir en tierra firme. Primera: Los reptiles desarrollaron huevos con cascarón impermeable que contenían el suministro de agua necesario para el embrión en desarrollo. Así, depositaban sus huevos en tierra firme, sin tener que hacerlo en los pantanos tan llenos de riesgos como los peces y los depredadores anfibios. Segunda: Los reptiles primitivos evolucionaron a una piel escamosa impermeable que les ayudaba a evitar la pérdida de agua corporal cuando el aire estaba seco. Tercera: Los reptiles mejoraron sus pulmones para que les proporcionaran todo el oxígeno necesario para tener una vida activa. A medida que el clima se fue haciendo más seco durante el periodo pérmico, los reptiles se volvieron los vertebrados que dominaron la tierra firme, relegando a los anfibios a las aguas pantanosas estancadas, donde aún vive la mayoría de ellos.

Unas cuantas decenas de millones de años después, el clima volvió a ser más estable y húmedo. Este periodo atestiguó la evolución hacia algunos reptiles muy grandes, en particular los dinosaurios. La variedad de las formas de dinosaurios llegó a ser enorme: desde los depredadores (**FIGURA 17-9**) hasta los vegetarianos; desde aquellos que dominaron la tierra firme, hasta los que volaban, e incluso los que regresaron al mar. Los dinosaurios fueron de los animales que tuvieron más éxito, si consideramos la persistencia como una medida de éxito. Florecieron durante más de mil millones de años, hasta hace unos 65 millones de años cuando se extinguieron los últimos dinosaurios. Nadie sabe con seguridad la causa de

FIGURA 17-9 Reconstrucción de un bosque cretácico
Ya para la era cretácica las plantas con flores predominaban en la vegetación terrestre. Los dinosaurios, como la manada depredadora de *Velociraptors* de casi dos metros de largo que aquí se muestra, eran los animales terrestres más destacados. Aunque pequeño en comparación con otros dinosaurios, el *Velocirraptor* era un depredador formidable que corría con gran rapidez y tenía dientes muy afilados y garras con forma de hoz en sus patas traseras.

su extinción, aunque todo parece indicar que fue por un meteorito gigantesco que impactó contra la Tierra (como veremos en la sección siguiente).

Aun durante la era de los dinosaurios, muchos reptiles continuaron siendo pequeños. Un problema principal al que se enfrentaron muchos reptiles fue conservar una elevada temperatura corporal. Para mantenerse activos en tierra firme era necesario que su cuerpo mantuviera una temperatura alta, con la cual aumentaban al máximo la eficiencia de los sistemas nervioso y muscular. No obstante, un cuerpo caliente pierde calor hacia el ambiente, a menos que el aire también esté caliente. La pérdida de calor representa un enorme problema para los animales pequeños, porque tienen mayor área superficial por unidad de peso que los animales más grandes. Muchas especies de pequeños reptiles conservaron un metabolismo lento y resolvieron el problema de la pérdida de calor, desarrollando modos de vida en los que permanecen activos sólo cuando el aire es suficientemente cálido. Sin embargo, dos grupos de reptiles pequeños, de forma independiente, siguieron una vía evolutiva diferente: desarrollaron un sistema aislante: uno adquirió plumaje y el otro pelaje.

Los reptiles dieron origen tanto a las aves como a los mamíferos

En las aves primitivas, las plumas aislantes ayudaban a conservar el calor corporal. En consecuencia, esos animales podían mantenerse activos en un hábitat fresco y durante la noche, cuando sus parientes escamosos se volvían lentos. Posteriormente, algunas aves primigenias desarrollaron plumas más largas y más fuertes en sus extremidades anteriores, quizá por efecto de una selección con base en la mejor capacidad para planear entre los árboles o saltar tras los insectos de los que se alimentaban. Finalmente, las plumas evolucionaron en estructuras capaces de permitir el vuelo por impulso propio. Las plumas totalmente desarrolladas e idóneas para el vuelo aparecen en fósiles de 150 millones de años de antigüedad, de modo que las estructuras aislantes más antiguas que terminaron por transformarse en plumas para volar debieron estar presentes hacía mucho tiempo atrás.

Los primeros **mamíferos** fósiles descubiertos hasta ahora tienen casi 200 millones de antigüedad. Los primeros mamíferos coexistieron con los dinosaurios. En su mayoría eran criaturas pequeñas. El mamífero más grande que se conoce de la era de los dinosaurios tenía el tamaño de un mapache actual; no obstante, las primeras especies de mamíferos eran todavía más pequeñas. Cuando se extinguieron los dinosaurios, sin embargo, los mamíferos colonizaron los hábitat que quedaron vacíos después de esa extinción. Las especies de mamíferos prosperaron y se diversificaron hasta alcanzar el repertorio de las formas modernas.

A diferencia de las aves que conservaron el hábito de los reptiles de poner huevos, los mamíferos alumbraban crías vivas y tenían la capacidad de alimentarlas con secreciones de las glándulas mamarias (que producen leche). Los mamíferos primitivos también adquirieron pelaje, el cual les daba aislamiento. Puesto que el útero, las glándulas mamarias y el pelo no se fosilizan, quizá nunca sepamos cuándo aparecieron esas estructuras por primera vez, o cómo eran sus formas intermedias. No obstante, recientemente un grupo de paleontólogos encontró fragmentos de pelo fosilizado y conservado en coprolitos, que son las heces animales fosilizadas. Estos coprolitos, que se encontraron en el desierto de Gobi, en China, fueron depositados por un depredador desconocido hace 55 millones de años, por lo que cabría suponer que los mamíferos han tenido pelo al menos desde entonces.

17.5 ¿CUÁL HA SIDO EL PAPEL DE LA EXTINCIÓN EN LA HISTORIA DE LA VIDA?

Si hubiera una moraleja del gran recuento de la historia de la vida, ésta sería que nada perdura. El relato de la vida puede leerse como una larga serie de dinastías evolutivas, donde cada nuevo grupo dominante surge, domina la tierra o los mares durante cierto tiempo e inevitablemente entra en decadencia y luego se extingue. Los dinosaurios son las más famosas de tales dinastías en decadencia; no obstante, la lista de los grupos extintos que conocemos sólo por sus fósiles es de una extensión impresionante. A pesar de lo inevitable de la extinción, sin embargo, las especies tienden a surgir con mayor rapidez que aquella con la que desaparecen, por lo que el número de especies sobre la Tierra suele aumentar con el tiempo.

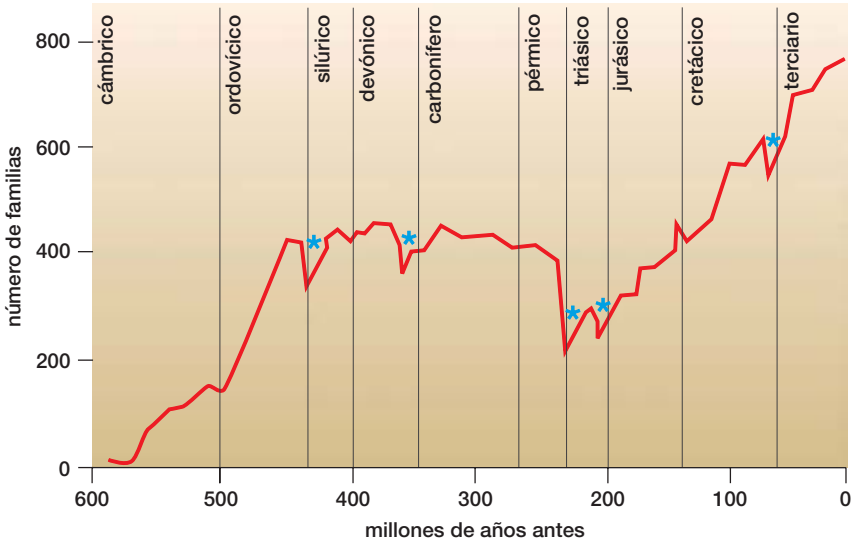


FIGURA 17-10 Extinciones masivas
Esta gráfica muestra el número de grupos de animales marinos contra el tiempo, según la reconstrucción del registro de fósiles. Observa la tendencia general hacia un número creciente de grupos, interrumpida en ocasiones por periodos de extinciones rápidas. Cinco de estas declinaciones, marcadas por un asterisco, son tan pronunciadas que se consideran extinciones en masa catastróficas. PREGUNTA: Si la extinción es el destino final de todas las especies, ¿cómo se incrementó el número total de especies a través del tiempo?

La historia de la evolución ha estado marcada por extinciones periódicas en masa

Durante gran parte de la historia de la vida, el proceso de sucesión dinástica se realizó de manera constante e inexorable. La lenta y continua rotación de las especies, sin embargo, se vio interrumpida por episodios de **extinción en masa** (FIGURA 17-10). Las extinciones en masa se caracterizan por la desaparición relativamente súbita de una extensa variedad de especies en gran parte de la Tierra. En los episodios de extinción en masa más catastróficos, desapareció más de la mitad de las especies del planeta. El peor de todos ellos, que se produjo hace 245 millones de años hacia el final del periodo pérmico, aniquiló a más del 90% de las especies del mundo, y la vida estuvo peligrosamente cerca de desaparecer en su totalidad.

El cambio climático contribuyó con las extinciones en masa

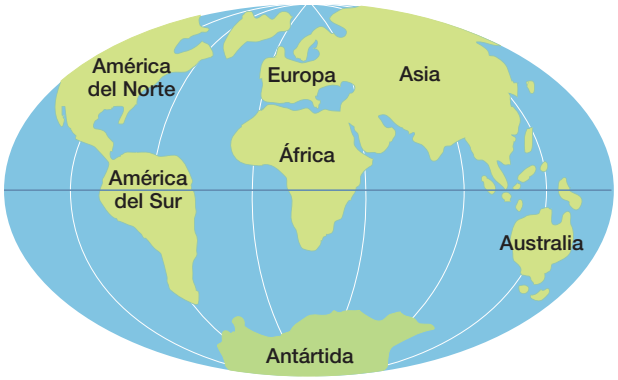
Las extinciones en masa han tenido profundas repercusiones en el curso de la historia de la vida y han vuelto a trazar el cuadro de su diversidad. ¿Qué pudo haber originado cambios tan dramáticos en la existencia de tantas especies? Muchos biólogos evolucionistas piensan que el cambio climático debió haber desempeñado un rol importante. Cuando se modifica el clima, como ha ocurrido muchas veces en el curso de la historia de la Tierra, los organismos que estaban adaptados a sobrevivir sujetos a un conjunto de condiciones ambientales tal vez sean incapaces de hacerlo en otras condiciones significativamente distintas. En particular, en las épocas en que el clima cálido fue sucedido por climas más secos y fríos, con temperaturas más variables, las especies se extinguieron al no conseguir adaptarse a las nuevas y más rigurosas condiciones.

Una de las causas del cambio climático es la modificación en la posición de los continentes. La superficie terrestre está dividida en secciones denominadas placas, que incluyen los continentes y el lecho marino. Las placas sólidas se desplazan lentamente sobre una capa viscosa, aunque fluida. Este movimiento se denomina **tectónica de placas**. Conforme las placas se mueven, su posición cambia en términos de latitud (FIGURA 17-11). Por ejemplo, hace 350 millones de años gran parte de América del Norte estaba situada en el ecuador o cerca de éste, en una región que se caracterizaba por tener un clima permanentemente cálido y lluvioso. Sin embargo, la tectónica de placas llevó el continente hacia regiones templadas y árticas. En consecuencia, el clima tropical fue sustituido por un régimen de cambios estacionales, temperaturas más bajas y menor precipitación pluvial. La tectónica de placas continúa en la actualidad; por ejemplo, el océano Atlántico se expande unos cuantos centímetros cada año.

a) hace 340 millones de años

b) hace 225 millones de años

c) hace 135 millones de años



d) en la actualidad

FIGURA 17-11 Desplazamiento continental por la tectónica de placas
Los continentes son como pasajeros sobre placas que se mueven sobre la superficie terrestre, como resultado de la tectónica de placas. ***a)*** Hace aproximadamente 340 millones de años, mucho de lo que ahora es América del Norte estaba ubicado en el ecuador. ***b)*** Con el tiempo, todas las placas se unieron en una gigantesca masa de tierra, a la cual los geólogos llaman Pangea. ***c)*** Gradualmente la Pangea se dividió en Laurasia y Gondwana, la cual a la postre se dividió en Gondwana occidental y oriental. ***d)*** Con el paso del tiempo, el desplazamiento de las placas dio como resultado las posiciones actuales de los continentes.

Los sucesos catastróficos pudieron haber causado las peores extinciones en masa

Los registros geológicos indican que la mayoría de las extinciones en masa coinciden con los periodos de cambio climático. Para muchos científicos, no obstante, la rapidez de las extinciones en masa sugiere que el lento proceso del cambio climático no fue el único responsable de tales desapariciones de especies a gran escala. Quizá los sucesos más repentinos también jugaron un papel importante. Por ejemplo, los sucesos geológicos catastróficos, como las erupciones volcánicas masivas, quizás hayan tenido efectos devastadores. Los geólogos han encontrado evidencia de erupciones volcánicas pasadas tan colosales que harían ver la explosión del monte Santa Elena, en 1980, como el estallido de un simple petardo. Aunque tales erupciones gigantescas afectarían directamente sólo a una pequeña porción de la superficie terrestre.

La búsqueda de las causas de las extinciones masivas dio un giro fascinante a inicios de la década de 1980, cuando Luis y Walter Álvarez propusieron que el suceso de la extinción de hace 65 millones de años, que aniquiló a los dinosaurios y muchas otras especies, fue causado por el impacto de un meteorito gigantesco. La idea de los Álvarez se recibió con gran escepticismo cuando fue presentada por primera vez, pero las investigaciones geológicas a partir de entonces han generado una gran cantidad de evidencias de que ese impacto masivo en realidad ocurrió hace 65 millones de años. De hecho, los investigadores identificaron el cráter Chicxulub, de 160 kilómetros de ancho, formado debajo de la península de Yucatán en México, como el lugar de impacto de un meteorito gigantesco (de 16 kilómetros de diámetro) que colisionó contra la Tierra precisamente en el tiempo en que desaparecieron los dinosaurios.

¿Pudo el impacto de ese inmenso meteorito haber causado la extinción masiva de los dinosaurios? Nadie lo sabe con certeza; no obstante, los científicos sugieren que tal impacto masivo hubiera arrojado tanto material de desecho hacia la atmósfera, que todo el planeta hubiera quedado en la oscuridad durante varios años. Como muy poca luz solar llegaría a la corteza terrestre, las temperaturas descenderían rápidamente, y la captación de energía para la fotosíntesis (de la cual depende a final de cuentas toda la vida terrestre) disminuiría drásticamente. Ese "invierno por impacto" a nivel mundial tal vez resultó mortal para los dinosaurios e infinidad de otras especies.

17.6 ¿CÓMO EVOLUCIONARON LOS SERES HUMANOS?

Los científicos están profundamente interesados en conocer el origen y la evolución de los seres humanos, en especial la evolución del sorprendente cerebro humano. El tema de la evolución humana que presentaremos en esta sección es una síntesis del pensamiento actual sobre este asunto. Sin embargo, es tema de especulación porque la evidencia fósil de la evolución humana es relativamente escasa. Los paleontólogos no se ponen de acuerdo sobre la interpretación de la evidencia fósil, en tanto que muchas ideas tienen que revisarse conforme se vayan encontrando nuevos fósiles.

Los seres humanos heredaron algunas adaptaciones de antiguos primates para vivir en los árboles

Los seres humanos son miembros del grupo de mamíferos conocido como **primates**, que incluye también a lémures, monos y simios. Los fósiles de primates más antiguos tienen 55 millones de años, pero como son relativamente raros en comparación con los de muchos otros animales, los primeros primates tal vez surgieron mucho antes, aunque no dejaron registro de fósiles. Tal vez los primeros primates se alimentaban de frutas y hojas, y estaban adaptados para vivir en los árboles. Muchos primates modernos aún conservan la forma de vida en los árboles de sus antepasados (FIGURA 17-12). La herencia común de los seres humanos y otros primates se refleja en un conjunto de características físicas que estaban presentes en los primates antiguos y que persisten en muchos primates modernos, incluidos los seres humanos.

La visión binocular dio a los antiguos primates una buena percepción de la profundidad

Una de las primeras adaptaciones de los primates parece haber sido la posesión de ojos grandes que miran hacia delante

FIGURA 17-12 Primates representativos
a) tarsero, ***b)*** el lémur y ***c)*** el mono macaco cola de león tienen la cara relativamente plana, con ojos dirigidos hacia delante que les brindan una visión binocular. Todos tienen, además, visión cromática y manos prensiles. Estas características, conservadas desde los primates más antiguos, las comparten los seres humanos.

(véase la figura 17-12). Saltar de una rama a otra es un asunto riesgoso, a menos que el animal sea capaz de determinar con precisión dónde se encuentra la próxima rama. La percepción efectiva de la profundidad fue posible gracias a la visión binocular que brindan los ojos enfocados hacia delante y con campos visuales que se traslapan. Otra adaptación clave fue la visión cromática. Es imposible saber, desde luego, si un animal fósil tenía una visión cromática; pero como los primates modernos tienen una excelente visión cromática, parece razonable suponer que los primates más antiguos también contaban con ella. Muchos primates se alimentan de frutos, y la visión cromática ayuda a identificar los que ya están maduros entre la multitud de hojas verdes.

Los primeros primates tenían manos prensiles

Los primeros primates tenían dedos largos y prensiles, con los cuales podían rodear un objeto y sostenerse de las ramas de los árboles. Esta adaptación para vivir en los árboles fue la base para la evolución posterior de las manos humanas capaces de realizar el *asimiento de precisión* (que emplean los seres humanos modernos para realizar maniobras delicadas como la manipulación de objetos pequeños, escribir y coser) y el *asimiento de potencia* (para acciones en que se requiere aplicar fuerza, como blandir un garrote o arrojar una lanza).

Un cerebro grande facilita la coordinación entre la mano y el ojo, así como las interacciones sociales complejas

En relación con el tamaño de su cuerpo, los primates tienen cerebros más grandes que los de la mayoría de los animales. Nadie sabe con certeza qué fuerzas ambientales favorecieron la evolución de cerebros grandes. Sin embargo, parece razonable suponer que el control y la coordinación de movimientos rápidos a través de los árboles, los movimientos diestros de las manos prensiles y la visión binocular cromática se logró gracias al poder del cerebro. La mayoría de los primates cuentan con sistemas sociales complejos, los cuales probablemente exigen una inteligencia relativamente grande. Si la sociabilidad favorecía la supervivencia y la reproducción, entonces habrían existido presiones ambientales tendentes a la evolución de cerebros más grandes.

Los fósiles del homínido más antiguo provienen de África

Tomando como base una comparación del DNA de chimpancés, gorilas y seres humanos modernos, los investigadores calculan que el linaje de **homínidos** (seres humanos y sus parientes fósiles) se desvió del linaje de los simios hace entre 5 y 8 millones de años. El registro de fósiles, no obstante, sugiere que esta separación ocurrió en el extremo inicial del periodo. Los paleontólogos que trabajaban en el territorio africano de Chad, en 2002, descubrieron los fósiles de un homínido, el *Sahelanthropus tchadensis*, que vivió hace más de 6 millones de años (**FIGURA 17-13**). El *Sahelanthropus* es claramente un homínido, ya que comparte varias características anatómicas con los miembros posteriores del grupo. Sin embargo, como este miembro más antiguo que se conoce de nuestra familia también presenta otras características que son más propias de los simios, representa un punto en nuestro árbol genealógico bastante próximo a la separación entre simios y homínidos.

Además del *Sahelanthropus*, otras dos especies de homínidos , se conocen de

FIGURA 17-13 El homínido más primitivo
Este cráneo casi completo del *Sahelanthropus tchadensis*, que tiene una antigüedad de más de 6 millones de años, es el fósil de homínido más antiguo que se haya encontrado.

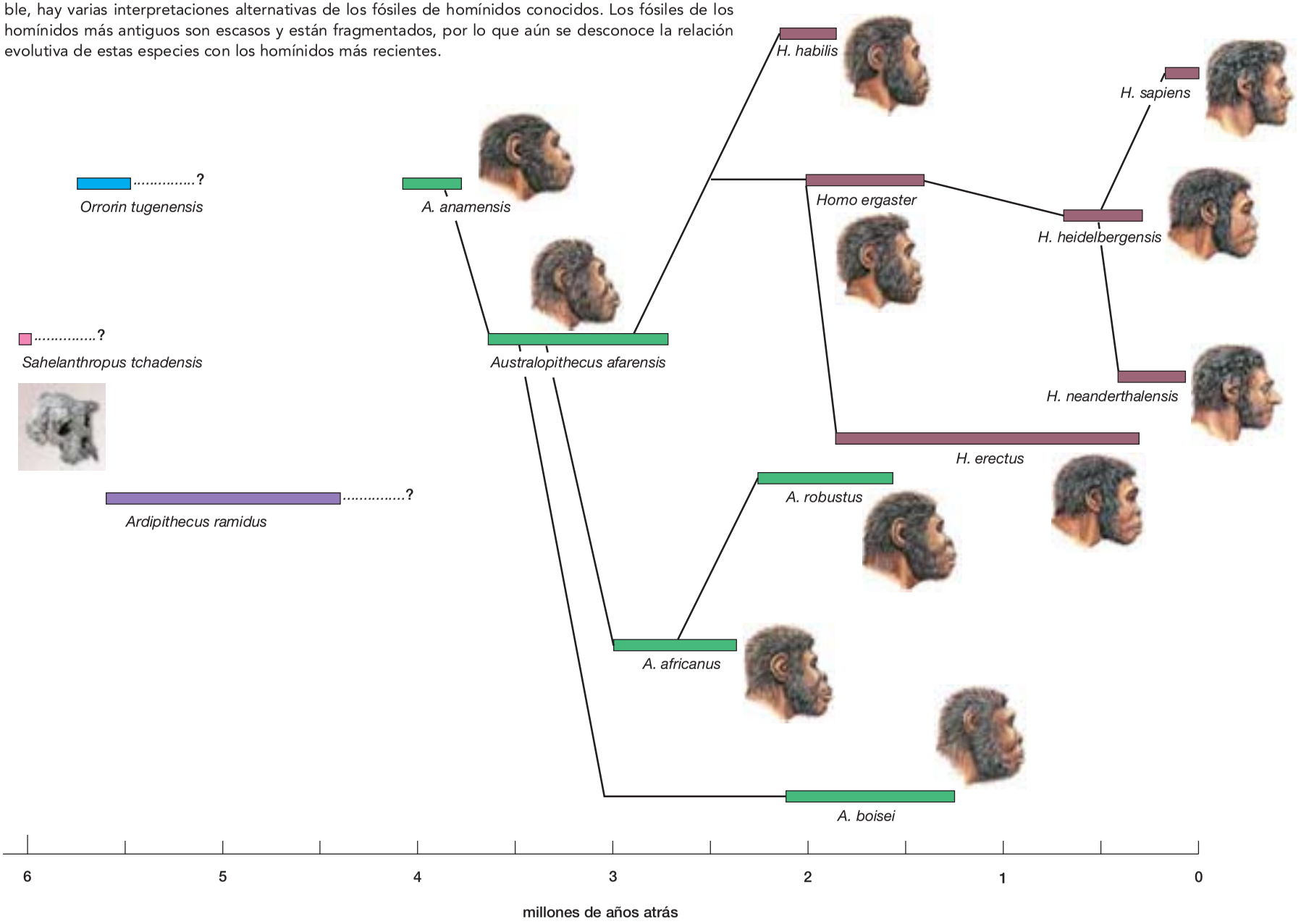
fósiles que aparecieron en rocas cuya antigüedad es de 4 a 6 millones de años. Nuestro conocimiento acerca de estos homínidos es escaso, porque hasta ahora únicamente se han encontrado unos cuantos especímenes, la mayoría en descubrimientos recientes que por lo general incluyen sólo partes pequeñas del esqueleto. Un registro más extenso de la evolución de los primeros homínidos no comienza sino hasta hace aproximadamente 4 millones de años. Esta fecha marca el inicio del registro de fósiles del género *Australopithecus* (**FIGURA 17-14**), un grupo de especies de homínidos africanos, cuyos cerebros eran más grandes que sus prehomínidos antepasados, pero mucho más pequeños que los de los seres humanos modernos.

Los homínidos más antiguos podían mantenerse en pie y caminar erguidos

Los australopitecinos más antiguos (como las diversas especies de *Australopithecus* se denominan en forma colectiva) tenían piernas más cortas con respecto a su estatura, que las de los seres humanos modernos; pero su articulación de la rodilla les permitía estirar sus piernas completamente, de manera que eran capaces de caminar erguidos usando ambas piernas (locomoción bípeda). Las huellas de pies de casi 4 millones de años de antigüedad, descubiertas en Tanzania por la antropóloga Mary Leakey, demostraron que aun los más antiguos australopitecinos caminaban erguidos, cuando menos algunas veces. La postura erguida se pudo haber desarrollado incluso más antiguamente. Los descubridores del *Sahelanthropus* y del *Orrorin* argumentan que los huesos de la pierna y el pie de estos homínidos primitivos tenían características que indican una locomoción bípeda; sin embargo, esta conclusión permanecerá como mera especulación hasta que se encuentren esqueletos más completos de esta especie.

Aún no se han comprendido cabalmente las razones para la evolución de locomoción bípeda entre los homínidos primitivos. Quizá los homínidos que eran capaces erguirse obtuvieron una ventaja al recolectar y transportar el alimento en su hábitat boscoso. Cualquiera que sea la causa, la evolución temprana de la postura erguida era extremadamente importante en la historia evolutiva de los homínidos porque les dio

Este árbol genealógico hipotético muestra las reconstrucciones faciales de especímenes representativos. Aunque muchos palentólogos consideran que éste es el árbol genealógico humano más probable, hay varias interpretaciones alternativas de los fósiles de homínidos conocidos. Los fósiles de los homínidos más antiguos son escasos y están fragmentados, por lo que aún se desconoce la relación evolutiva de estas especies con los homínidos más recientes.



libertad para usar las manos al caminar. Posteriormente, los homínidos fueron capaces de llevar armas, manipular herramientas y, con el tiempo, llevar a cabo las revoluciones culturales que son obra del *Homo sapiens* moderno.

Varias especies de *Australopithecus* surgieron en África

La especie de australopitecinos más antigua, representada por dientes, fragmentos de cráneo y huesos del brazo fosilizados, se desenterró cerca de un antiguo lecho lacustre en Kenia, de sedimentos de entre 3.9 y 4.1 millones de años de antigüedad, según el método de fechado con isótopos radiactivos (véase "Investigación científica: ¿Cómo sabemos qué tan antiguo es un fósil?"). Sus descubridores lo llamaron *Australopithecus anamensis* (*anam* significa "lago" en el idioma etíope local). El segundo australopitecino más antiguo, llamado *Australopithecus afarensis*, fue descubierto en la región de Afar de Etiopía. Se han desenterrado restos fósiles de esta especie de hasta 3.9 millones de años de antigüedad. El linaje del *A. afarensis* aparentemente dio origen a, por lo menos, dos formas distintas: a la especie de omnívoros pequeños del *A. africanus* (que era parecido al *A. afarensis* en tamaño y en hábitos alimenticios), y la especie herbívora del *A. robustus* y el *A. boisei*. Todas las especies de australopecinos quizá se extinguieron hace unos 1.2 millones de años, pero uno de ellos (el *A. afarensis* cuya interpretación se muestra en la figura 17-14) dieron origen, primero, a una nueva rama del árbol genealógico de la familia de los homínidos: el género *Homo*.

El género *Homo* se derivó del australopitecino hace 2.5 millones de años

Los homínidos que se asemejan lo suficiente a los seres humanos modernos como para asignarlos al género *Homo*, aparecieron por primera vez en los fósiles de África, cuya antigüedad es de casi 2.5 millones de años. Entre los fósiles *Homo* más primitivos de África están el *H. habilis* (véase la figura 17-14), una especie cuyo cuerpo y cerebro eran más grandes que los de los australopitecinos, aunque conservaron los simiescos brazos largos y las piernas cortas de los ancestros australopitecinos. En contraste, la anatomía esquelética del *H. ergaster*, una especie cuyos fósiles aparecieron primero hace 2 millones de años, tiene proporciones en sus extremidades que se parecen más a los seres humanos modernos. Muchos paleoantropólogos (científicos que estudian los orígenes de la humanidad) creen que esta especie es una rama evolutiva que condujo finalmente a nuestra propia especie, el *H. sapiens.* Desde esta perspectiva, el *H. ergaster* fue el ancestro común de dos ramas distintas de homínidos. La primera rama condujo al *H. erectus*, que fue la primera especie de homínidos en salir de África. La segunda rama proveniente del *H. ergaster*, que condujo finalmente al *H. heidelbergensis,* algunos de los cuales emigraron a Europa y dieron origen al hombre de Neanderthal, es decir, al *H. neanderthalensis*. Mientras tanto, en África se separó otra rama del linaje del *H. heilderbergensis.* Esta rama finalmente se convirtió en el *H. sapiens*, el hombre moderno.

La evolución del *Homo* estuvo acompañada por adelantos en la tecnología de las herramientas

La evolución de los homínidos está estrechamente ligada a la invención de herramientas, un sello característico del comportamiento de los homínidos. Las herramientas más antiguas descubiertas hasta la fecha se encontraron en rocas de África oriental de 2.5 millones de antigüedad, época que coincide con el surgimiento inicial del género *Homo.* El *Homo* primitivo, cuyos molares eran mucho más pequeños que los del género australopitecino, pudo haber empleado algunas herramientas de piedra para romper y machacar alimentos duros que le eran muy difíciles de masticar. Los homínidos construyeron sus primeras herramientas al golpear una roca contra otra para quitar fragmentos y obtener un borde filoso. Durante los siguientes varios cientos de miles de años, las técnicas para hacer herramientas en África fueron mejorando de forma paulatina. Hace más o menos 1.7 millones de años, las herramientas se volvieron más complejas. Se logró la simetría en ambos lados de una roca para formar herramientas de doble filo, entre las que se incluían desde hachas de mano para cortar

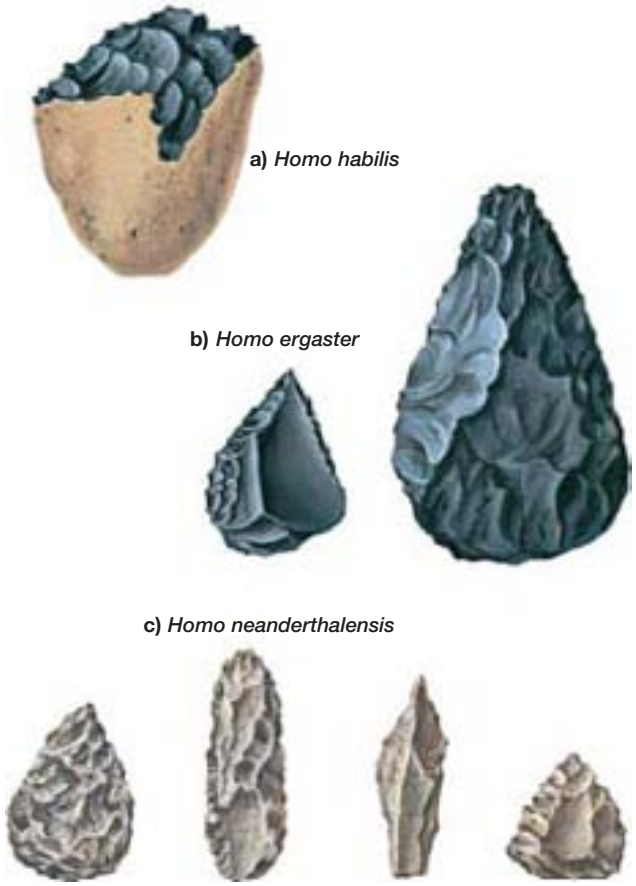


FIGURA 17-15 Herramientas representativas de homínidos
a) El *Homo habilis* produjo sólo herramientas muy rudimentarias para cortar, llamadas *hachas de mano*, por lo general sin tallar en un extremo para asirla con la mano. ***b)*** El *Homo ergaster* logró hacer herramientas más finas; por lo común, las piedras eran filosas en todo su alrededor; cuando menos algunas se ataban a un mango para no tener que sostenerlas con la mano. ***c)*** Las herramientas del hombre de Neanderthal eran obras de arte, con bordes extremadamente filosos al tallarlas para desprender pequeñas hojuelas de piedra. Si se comparan estas armas, observa cómo el número de escamas removidas aumenta de forma progresiva con la correspondiente disminución de su tamaño. Al disminuir el tamaño y al mismo tiempo aumentar el número de hojuelas se logran armas más filosas. Esto sugiere una idea del cuidado con que se hacían dichas herramientas, con mucha paciencia, y un control más fino de los movimientos de la mano, o quizá con todo ello en conjunto.

y desmenuzar, hasta puntas de lanza (**FIGURA 17-15a, b**). El *Homo ergaster* y otros que portaban estas armas con toda seguridad comían carne, quizás obtenida mediante la caza o la búsqueda de restos de presas muertas por otros depredadores. Las herramientas de doble filo fueron llevadas a Europa hace al menos 600,000 años por poblaciones migrantes de *H. heildelbergensis*, y los hombres de Neanderthal descendientes de estos inmigrantes llevaron la construcción de herramientas de piedra a nuevos niveles de destreza y delicadeza (**FIGURA 17-15c**).

Los hombres de Neanderthal tenían cerebros grandes y excelentes herramientas

El hombre de Neanderthal apareció por primera vez en el registro de fósiles europeo hace alrededor de 150,000 años. Hace aproximadamente 70,000 años ya se había diseminado por toda Europa y Asia occidental; sin embargo, hace 30,000 años el hombre de Neanderthal ya se había extinguido.

En contraste con la imagen popular que se tiene del "cavernario" tosco y cargado de hombros, el hombre de Neanderthal era bastante parecido al ser humano moderno en muchos sentidos. Aunque más musculoso, el Neanderthal caminaba completamente erguido, tenía la destreza suficiente para fabricar herramientas de piedra finamente elaboradas, y poseía un cerebro que, en promedio, era ligeramente más grande que el del ser humano moderno. Muchos fósiles del Neanderthal europeo muestran grandes protuberancias óseas en donde van las cejas, así como un cráneo ancho y plano; otros, en especial provenientes de las regiones ubicadas en los alrededores de las costas orientales del mar Mediterráneo, en cierto grado eran físicamente parecidos al *H. sapiens*.

A pesar de las similitudes tanto físicas como tecnológicas entre el *H. neanderthalensis* y el *H. sapiens*, no hay evidencias arqueológicas contundentes de que los Neanderthales hayan desarrollado una cultura adelantada que incluyera realizaciones humanas características como el arte, la música y los rituales. Algunos antropólogos señalan que, debido a que su anatomía esquelética muestra que fueron físicamente capaces de emitir los sonidos requeridos para el habla, los Neanderthales pudieron haber logrado tener cierto lenguaje. Esta interpretación de la anatomía del hombre de Neanderthal, sin embargo, no se acepta de forma unánime. En general, la evidencia disponible de la forma de vida del hombre de Neanderthal es limitada y está abierta a diferentes interpretaciones, por lo que los antropólogos debaten, algunas veces de manera acalorada, acerca de qué tan avanzada llegó a ser la cultura Neanderthal.

Aunque algunos antropólogos sostienen que el hombre de Neanderthal era simplemente una variedad del *H. sapiens*, la mayoría de ellos está de acuerdo en que era una especie separada. Una evidencia importante que apoya esta hipótesis proviene de los investigadores que aislaron el DNA de los esqueletos del Neanderthal y del *H. sapiens* comparten secuencias similares. Tales hallazgos indican que la rama evolutiva que conduce a los Neanderthales se separó del linaje humano ancestral, cientos de miles de años antes de la aparición del *H. sapiens* moderno.

Los seres humanos modernos surgieron hace menos de 200,000 años

El registro de fósiles muestra que los seres humanos anatómicamente modernos aparecieron en África hace cuando menos 160,000 años y posiblemente hasta hace 195,000 años. La ubicación de estos fósiles sugiere que el *Homo sapiens* se originó en África; no obstante, la mayoría de nuestro conocimiento acerca de nuestra historia primitiva proviene de fósiles humanos encontrados en Europa y Oriente Medio, que se conocen de forma colectiva como Cro-Magnon (por la localidad francesa donde originalmente se descubrieron sus restos). El Cro-Magnon apareció hace aproximadamente 90,000 años. Tenía la cabeza en forma de domo, cejas lisas y mentón prominente (como nosotros). Sus herramientas eran instrumentos de precisión similares a los pedernales utilizados hasta hace poco en muchas partes del mundo.

En cuanto al comportamiento, parece que el Cro-Magnon era parecido al Neanderthal, aunque más refinado. Los artefactos de 30,000 años de antigüedad que se han encontrado en sitios arqueológicos del hombre de Cro-Magnon incluyen elegantes flautas de hueso, estupendas esculturas talladas en marfil y evidencia de complejas ceremonias mortuorias (**FIGURA 17-16**). Quizás el logro más extraordinario del Cro-Magnon sean las magníficas pinturas rupestres elaboradas en cuevas de Altamira en España y en Lascaux y Chauvet en Francia (**FIGURA 17-17**). Las pinturas rupestres más antiguas que se han encontrado hasta la fecha tienen más de 30,000

FIGURA 17-16 Tumba del paleolítico
Esta tumba de hace 24,000 años muestra evidencia de que el pueblo Cro-Magnon enterraba a sus difuntos con rituales. El cuerpo se cubría con un tinte conocido como rojo ocre, con un tocado hecho de pequeñas conchas y una herramienta de pedernal en la mano.

años de antigüedad, en las cuales —incluso en las más primitivas— se empleó una técnica artística refinada. Nadie sabe con exactitud con qué finalidad se hicieron tales pinturas, pero son testimonio de que fueron concebidas por mentes tan humanas como las nuestras.

Los hombres de Cro-Magnon y de Neanderthal coexistieron

Los hombres de Cro-Magnon coexistieron con los de Neanderthal en Europa y Oriente Medio durante quizá 50,000 años antes de la desaparición de los Neanderthales. Algunos investigadores creen que los Cro-Magnon se cruzaron extensamente con los Neanderthales, de modo que éstos básicamente fueron absorbidos por la principal corriente genética humana. Otros científicos no están de acuerdo, y citan evidencias como la del DNA de fósil descrita antes, y sugieren que los Cro-Magnon que llegaron después simplemente invadieron y desplazaron de sus territorios a los menos adaptados Neanderthales.

Ninguna de estas hipótesis parece ser la indicada para explicar satisfactoriamente cómo dos clases de homínidos pudieron habitar las mismas regiones geográficas durante tanto tiempo. La persistencia en una misma región de dos grupos similares, aunque distintos, durante decenas de miles de años parece incongruente tanto con el cruzamiento como con la competencia directa. Tal vez la competencia entre el *H. neanderthalensis* y el *H. sapiens* fue indirecta, de manera que las dos especies fueron capaces de coexistir durante un tiempo en el mismo hábitat, hasta que la capacidad superior del *H. sapiens* aprovechó los recursos disponibles y lentamente fue expulsando a los Neanderthal hasta su total extinción.

Varias oleadas de homínidos emigraron de África

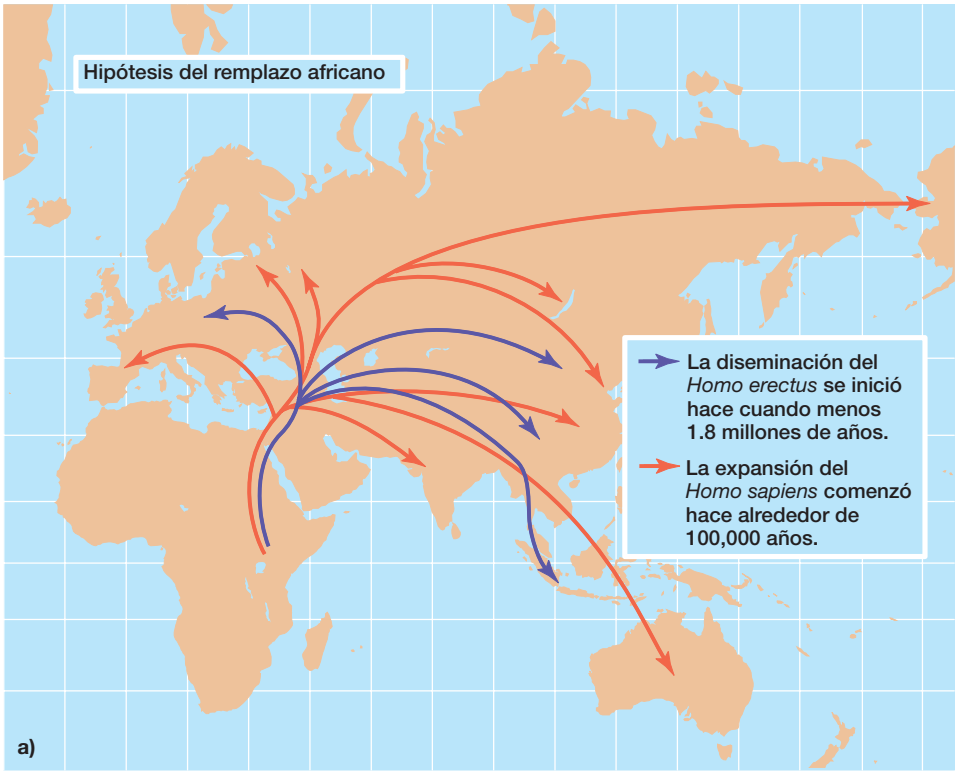
El árbol genealógico de los seres humanos tiene sus raíces en África; no obstante, los homínidos lograron salir de este continente en diversas ocasiones. El *H. erectus*, por ejemplo, llegó al Asia tropical hace casi 2 millones de años y aparentemente vivió ahí, y con el tiempo se fue esparciendo a lo largo de Asia. Asimismo, el *H. heidelbergensis* llegó a Europa hace al menos unos 780,000 años. Cada vez es más evidente que el género *Homo* realizó en forma repetida emigraciones hacia lugares muy distantes, que iniciaba tan pronto como evolucionaba la anatomía de sus extremidades. Lo que no es tan claro es cómo este desplazamiento se relaciona con el origen del *H. sapiens* moderno. De acuerdo con la hipótesis del "remplazo africano" (la base del escenario esbozado antes), el *H. sapiens* surgió en África y se dispersó hace menos de 150,000 años, diseminándose hacia el Cercano Oriente, Europa y Asia, y remplazando a todos los demás homínidos (**FIGURA 17-18a**). No obstante, algunos paleoantropólogos consideran que las poblaciones de *H. sapiens* evolucionaron simultáneamente en muchas regiones, a partir de las poblaciones ya diseminadas del *H. erectus*. Según esta hipótesis del "origen multirregional", las continuas migraciones y cruzas entre poblaciones de *H. erectus*, en diferentes regiones del mundo, las conservaron como una especie única, a medida que evolucionaron de forma gradual hasta el *H. sapiens* (**FIGURA 17-18b**). Aunque un número cada vez mayor de estudios del DNA del ser humano moderno apoyan el modelo del remplazo africano sobre el origen de nuestra especie, ambas hipótesis son consistentes con el registro de fósiles. Por consiguiente, la pregunta permanece sin respuesta definitiva.

FIGURA 17-17 El arte del pueblo Cro-Magnon
Pinturas rupestres del pueblo Cro-Magnon, extraordinariamente conservadas debido a las condiciones subterráneas constantes en una cueva de Lascaux, Francia.

El origen evolutivo de los cerebros grandes quizás esté relacionado con el consumo de carne

Las características físicas principales que nos diferencian de nuestros parientes más cercanos, los simios, son nuestros cerebros grandes y altamente desarrollados, y la postura erecta. Como se describió antes, la postura erguida surgió en forma muy temprana en la evolución de los homínidos, y éstos caminaron erguidos durante varios millones de años antes del surgimiento de la especie *Homo* con cerebro grande. ¿Qué circunstancias originaron la evolución en el aumento del tamaño del cerebro? Se han propuesto muchas explicaciones, pero se tiene disponible muy poca evidencia directa: las hipótesis acerca de los orígenes evolutivos de los cerebros grandes son necesariamente especulativas.

Una explicación propuesta sobre el origen de los cerebros grandes sugiere que éstos evolucionaron como respuesta a las cada vez más complejas interacciones sociales. En particular, la evidencia fósil sugiere que, hace aproximadamente 2 millones de años, la vida social de los homínidos comenzó a incluir un nuevo tipo de actividad: la caza comunitaria de animales grandes. El acceso resultante a cantidades significativas de carne debió fomentar la necesidad de idear métodos para la distribución de este valioso y limitado recurso entre los miembros del grupo. Algunos antropólogos suponen que los individuos más capaces para manejar esta interacción social tuvieron más éxito para obtener una mayor porción de carne, y usarla para su propio beneficio. Quizás esta interacción social se realizó mejor por los individuos con cerebros más grandes y poderosos y, por lo tanto, la selección natural favoreció a tales individuos. Las observaciones de las sociedades de chimpancés han demostrado que la distribución de la carne de animales cazados por un grupo a menudo implicaba com-


Hipótesis del remplazo africano
La diseminación del *Homo erectus* se inició hace cuando menos 1.8 millones de años.
La expansión del *Homo sapiens* comenzó hace alrededor de 100,000 años.
a)

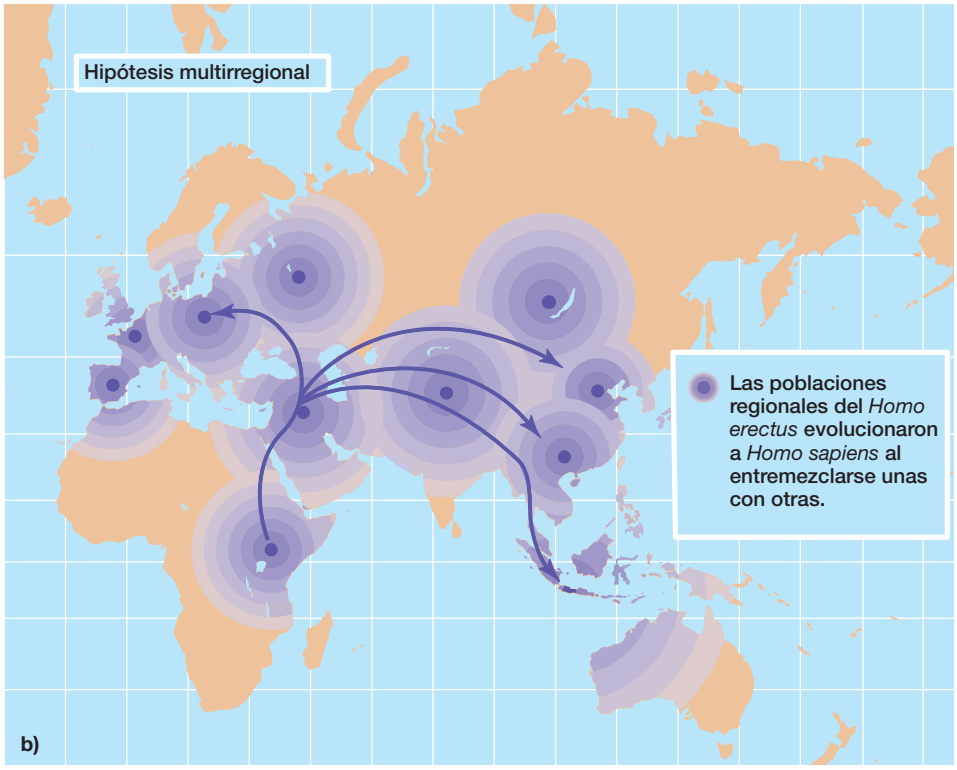

Hipótesis multirregional
Las poblaciones regionales del *Homo erectus* evolucionaron a *Homo sapiens* al entremezclarse unas con otras.
b)

FIGURA 17-18 Competencia entre las hipótesis acerca de la evolución del *Homo sapiens*

La hipótesis del "remplazo africano" sugiere que el *H. sapiens* evolucionó en África, luego migró hacia Cercano Oriente, Europa y Asia, desplazando a las otras especies de homínidos que estaban presentes en aquella regiones. ***b***) La hipótesis "multirregional" sugiere que las poblaciones de *H. sapiens* evolucionaron simultáneamente en muchas regiones, a partir de las ya muy difundidas poblaciones del *H. erectus*. PREGUNTA: Los paleontólogos descubrieron recientemente fósiles de homínidos con características de los seres humanos modernos, en sedimentos de 160,000 años de antigüedad en África. ¿Qué hipótesis apoya esta nueva evidencia?

plejas interacciones sociales, en las cuales la carne se usaba para formar alianzas, devolver favores, tener acceso a parejas sexuales, pacificar a los rivales, etcétera. Quizá la habilidad mental requerida para planear, evaluar y recordar tales interacciones fue la fuerza impulsora detrás de la evolución de nuestros cerebros grandes e inteligentes.

El origen evolutivo de la conducta humana es altamente especulativo

Incluso después de la evolución de cerebros comparativamente grandes en especies como el *H. erectus*, pasaron más de un millón de años antes del origen de los seres humanos modernos y de sus cerebros muy grandes. Y aun después de la primera aparición del *H. sapiens* moderno, transcurrieron más de 100,000 años antes de que surgiera cualquier evidencia arqueológica de las características distintivamente humanas, que fueron posibles gracias a un cerebro grande: el lenguaje, el pensamiento abstracto y la cultura avanzada. El origen evolutivo de tales rasgos humanos es otra pregunta que permanece sin respuesta, en parte porque nunca se ha encontrado evidencia directa de la transición hacia una cultura avanzada. Los seres humanos primitivos capaces de tener un lenguaje y pensamientos simbólicos no necesariamente crearon artefactos que indicaran dichas habilidades. Podemos descubrir algunas pistas al estudiar a nuestros parientes simios, quienes manifiestan versiones menos complejas de muchas conductas y procesos mentales humanos. Su comportamiento sería parecido al de los homínidos ancestrales. No obstante, el origen tardío y aparentemente rápido de la compleja cultura humana sigue siendo un enigma.

La evolución cultural de los seres humanos es ahora mucho más rápida que la evolución biológica

En los últimos milenios, la evolución humana ha estado dominada por la *evolución cultural*, es decir, la transmisión de conductas aprendidas de generación en generación. Nuestro reciente éxito evolutivo, por ejemplo, fue generado no tanto por nuevas adaptaciones físicas, sino por una serie de revoluciones culturales y tecnológicas. La primera de esas revoluciones fue la invención de herramientas, que se inició con los primeros homínidos. Las herramientas incrementaron la eficiencia para conseguir alimentos y refugios, de manera que se favoreció el hecho de que creciera el número de individuos capaces de sobrevivir dentro de un ecosistema dado. Hace aproximadamente 10,000 años, la cultura humana tuvo una segunda revolución cuando la gente descubrió cómo cultivar plantas y cómo domesticar animales. Esta revolución agrícola incrementó de manera significativa la cantidad de alimento que podía extraerse del entorno, y así la población humana aumentó vertiginosamente desde casi 5 millones en los albores de la agricultura, hasta cerca de 750 millones en 1750. La revolución industrial que sucedió después dio origen a la economía moderna y a las mejoras relacionadas en materia de salud pública. Una mayor expectativa de vida y una menor tasa de muertes infantiles condujeron a un verdadero crecimiento explosivo de la población, ya que en la actualidad somos más de 6000 millones de personas.

La evolución cultural humana y los incrementos inherentes en las poblaciones influyeron de manera significativa en la continua evolución biológica de otras formas de vida. Nuestras manos hábiles y mentes ágiles han transformado muchos de los hábitat terrestres y acuáticos del planeta. Los seres humanos nos hemos convertido en el agente individual más abrumador de la selección natural. En palabras del finado biólogo Stephen Jay Gould, "hemos llegado a ser, en virtud de un glorioso accidente evolutivo llamado inteligencia, los administradores de la continuidad de la vida en la Tierra. No pedimos que se nos asignara ese papel, pero no podemos rechazarlo. Quizá no seamos los más adecuados para desempeñarlo, pero aquí estamos".

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO

GENTE PEQUEÑA, HISTORIA GRANDE

Para mucha gente, el descubrimiento del *Homo floresiensis* fue emocionante en parte porque ello sugirió la idea de que nuestra especie podría tener parientes más cercanos de los que sospechábamos, y que cuando menos algunos de ellos vivieron tentadoramente cerca del presente. Además, la idea de una sociedad de seres humanos de corta estatura parece tener un atractivo inherente. Sin embargo, el descubrimiento hace que surjan muchas preguntas fascinantes sobre la evolución.

Algunas de tales preguntas están relacionadas con los antepasados del *H. floresiensis*. Algunas de las pistas apuntan hacia un escenario intrigante. Primero, la única evidencia del hogar del homínido primitivo en la isla Flores consiste en las herramientas de piedra que se encontraron en un sitio con 840,000 años de antigüedad. La edad y lo rudimentario de las herramientas sugieren que probablemente las dejó el *H. erectus*, el único homínido que se sabe estuvo en Asia en aquellos tiempos. Así que el *H. floresiensis* conclusión se basa en algunas semejanzas anatómicas entre el *H. floresiensis* y el *H. erectus*. Curiosamente el *H. floresiensis* se parece más a los especímenes de *H. erectus* encontrados en un sitio con una antigüedad de 1.8 millones de años en Asia central, que con los especímenes mucho más jóvenes del *H. erectus* que se encontraron en sitios relativamente cercanos a otras islas indonesias. Quizás el *H. floresiensis* descendió de una oleada muy temprana de migrantes *erectus*.

Independientemente de cuál grupo de homínidos dio origen al *H. floresiensis*, no resulta obvia la manera en que las poblaciones ancestrales llegaron a la isla. A diferencia de algunas otras islas, Flores nunca estuvo conectada a tierra firme. Por lo general, los arqueólogos están de acuerdo en que los homínidos no construyeron botes, sino hasta hace 60,000 años. Entonces, ¿cómo llegó el *H. erectus* a Flores hace casi 800,000 años antes de la invención de los botes? Tal vez se desplazaron usando montículos de vegetación flotantes.

Otra pregunta interesante acerca del fuera pequeña. Las especies de animales grandes que se encuentran aisladas en islas algunas veces evolucionan a cuerpos más pequeños. Por ejemplo, los elefantes que habitaron la isla de Flores, ahora extintos, medían solamente 1.20 metros de altura. Los biólogos sugieren que la ausencia de depredadores grandes en la mayoría de las islas elimina muchos de los beneficios de tener un gran tamaño, confiriendo así la ventaja a los individuos más pequeños que requieren menos alimentos. ¿Este tipo de dinámica impulsó la evolución de tener corta estatura en el *H. floresiensis*? ¿Están los cuerpos de los homínidos, que tienen armas para defenderse contra los depredadores y herramientas para ayudarse a obtener alimentos, sujetos a las mismas presiones evolutivas que dan forman a los cuerpos de otros animales?

Piensa en esto El *H. floresiensis*

REPASO DEL CAPÍTULO

RESUMEN DE CONCEPTOS CLAVE

17.1 ¿Cómo empezó la vida?

Antes de que surgiera la vida, los relámpagos, la luz ultravioleta y el calor formaron las moléculas orgánicas a partir del agua y de los componentes de la atmósfera terrestre primigenia. Estas moléculas probablemente incluían ácidos nucleicos, aminoácidos, proteínas cortas y lípidos. Por casualidad, algunas moléculas de RNA quizás hayan tenido propiedades enzimáticas, catalizando así la formación de copias de sí mismas, a partir de los nucleótidos en las aguas de la Tierra. Estas moléculas pudieron ser las precursoras de la vida. Las microesferas de proteínas y lípidos que encerraban estas ribozimas quizá formaron la primera protocélula.

17.2 ¿Cómo eran los organismos primitivos?

Los fósiles más antiguos, de cerca de 3500 millones de años, provienen de células procariotas que se alimentaban al absorber las moléculas orgánicas sintetizadas del ambiente. Como no había oxígeno libre en la atmósfera, su metabolismo energético debió haber sido anaeróbico. A medida que se multiplicaron las células, agotaron las moléculas orgánicas que se habían formado por la síntesis prebiótica. Algunas células desarrollaron la capacidad de sintetizar sus propias moléculas alimentarias, utilizando las moléculas inorgánicas sencillas y la energía de la luz solar. Estas células fotosintéticas primitivas fueron probablemente los antepasados de las actuales cianobacterias.

La fotosíntesis libera oxígeno como subproducto y, hace unos 2200 millones de años, se acumularon en la atmósfera cantidades importantes de oxígeno libre. El metabolismo aeróbico, el cual genera más energía celular que el metabolismo anaeróbico, probablemente surgió por aquel entonces.

Las células eucarióticas evolucionaron hace alrededor de 1700 millones de años. Las primeras células eucarióticas probablemente surgieron como asociaciones simbióticas entre las células procarióticas depredadoras y otras bacterias. Las mitocondrias pudieron haber evolucionado a partir de las bacterias aeróbicas fagocitadas por células depredadoras. De manera similar, los cloroplastos tal vez hayan evolucionado a partir de cianobacterias fotosintéticas.

Web tutorial 17.1 La hipótesis de los endosimbiotas

17.3 ¿Cómo eran los primeros organismos multicelulares?

Los organismos multicelulares evolucionaron a partir de células eucarióticas, y aparecieron primero en los mares hace aproximadamente 1000 millones de años. La multicelularidad ofrece varias ventajas, como un tamaño más grande. En las plantas, el mayor tamaño ofrecía cierta protección contra la depredación. La especialización de las células permitió a las plantas afianzarse en las aguas costeras ricas en nutrimentos y bien iluminadas. En los animales, la multicelularidad les permitía una depredación más eficiente y huir con mayor facilidad de los depredadores. Éstos, a la vez, crearon presiones ambientales para una locomoción más rápida, mejores sentidos y mayor inteligencia.

17.4 ¿Cómo llegó la vida a la tierra firme?

Los primeros organismos terrestres probablemente fueron las algas. Las primeras plantas terrestres multicelulares aparecieron hace alrededor de 400 millones de años. Aunque la vida en tierra firme requería de adaptaciones especiales para el soporte del cuerpo, la reproducción y la adquisición, distribución y retención del agua, la tierra firme ofrecía también abundante luz solar y protección contra los herbívoros acuáticos. Poco después de que las plantas evolucionaron, los artrópodos invadieron la tierra firme. La ausencia de depredadores y la abundancia de plantas terrestres en busca de alimento probablemente facilitaron la invasión de la tierra por los animales.

Los primeros vertebrados terrestres evolucionaron de los peces con aleta lobular, que tenían aletas como patas y un pulmón primitivo. Un grupo de estos peces evolucionó en anfibios hace cerca de 350 millones de años. Los reptiles evolucionaron a partir de los anfibios, con varias adaptaciones adicionales para la vida terrestre: huevos impermeables que se depositaban en tierra firme, piel impermeable y mejores pulmones. Las aves y los mamíferos evolucionaron de forma independiente a partir de grupos de reptiles diferentes. Un adelanto principal en la evolución tanto de las aves como de los mamíferos fue el aislamiento de la superficie corporal mediante plumaje o pelaje.

17.5 ¿Cuál ha sido el papel de la extinción en la historia de la vida?

La historia de la vida se ha caracterizado por la constante rotación de especies, ya que conforme algunas se extinguen, son remplazadas por otras nuevas. La extinción en masa, en la cual desaparece un gran número de especies en un tiempo relativamente corto, ocurre periódicamente. Las extinciones en masa fueron quizá causadas por alguna combinación de cambios climáticos y sucesos catastróficos, como erupciones volcánicas e impactos de meteoritos.

Web tutorial 17.2 Desplazamiento de continentes a partir de la tectónica de placas

17.6 ¿Cómo evolucionaron los seres humanos?

Un grupo de mamíferos evolucionó en primates que vivían en los árboles, que fueron los antepasados de los simios y de los seres humanos. Los linajes de simios y seres humanos divergieron hace de 7 a 8 millones de años. Los fósiles de homínidos más antiguos conocidos tienen de 6 a 7 millones de años de antigüedad y se encontraron en África. El primer linaje bien conocido de homínidos, el australopitecino, surgió en África hace aproximadamente 4 millones de años. Estos homínidos caminaban erguidos, tenían cerebros más grandes que sus ancestros y fabricaban herramientas primitivas bien labradas. Un grupo de australopitecinos dio origen a un linaje de homínidos del género *Homo*, del cual a la vez surgieron los seres humanos modernos.

TÉRMINOS CLAVE

anfibio *pág. 343*
artrópodo *pág. 342*
conífera *pág. 342*
eucariótica *pág. 337*
exoesqueleto *pág. 342*
extinción en masa *pág. 345*
generación espontánea *pág. 332*
hipótesis endosimbiótica *pág. 337*
homínido *pág. 347*
mamífero *pág. 344*
peces con aleta lobular *pág. 342*
primate *pág. 346*
procariota *pág. 335*
protocélula *pág. 334*
tectónica de placas *pág. 345*
reptil *pág. 343*
ribozima *pág. 334*

RAZONAMIENTO DE CONCEPTOS

1. ¿Cuál es la evidencia de que la vida pudo haberse originado a partir de la materia inanimada en la Tierra primigenia? ¿Qué clase de evidencia te gustaría ver antes de que aceptaras esta hipótesis?
2. Si las células primitivas con metabolismo aeróbico fueran mucho más eficientes para producir energía, ¿por qué no generaron la extinción de las células que sólo tienen metabolismo anaeróbico?
3. Explica la hipótesis endosimbiótica acerca del origen de los cloroplastos y las mitocondrias.
4. Indica dos ventajas de la multicelularidad de las plantas y dos ventajas para los animales.
5. ¿Qué ventajas y desventajas hubiera tenido la existencia terrestre para las primeras plantas que invadieron la tierra firme? ¿Y para los animales?
6. Describe las adaptaciones principales que surgieron durante la evolución de los vertebrados, a partir de los peces hasta anfibios, reptiles, aves y mamíferos. Explica cómo estas adaptaciones incrementaron la eficacia biológica de los diversos grupos para la vida en la tierra firme.
7. Describe la evolución de los seres humanos a partir de los primeros primates. Incluye en tu explicación características como visión binocular, manos prensiles, locomoción bípeda, vida social, elaboración de herramientas y expansión cerebral.

APLICACIÓN DE CONCEPTOS

1. ¿Qué es evolución cultural? ¿La evolución cultural es más rápida o más lenta que la evolución biológica? ¿Por qué?
2. ¿Piensas que al estudiar a nuestros antepasados se puede arrojar alguna luz sobre la conducta de los seres humanos actuales? ¿Por qué?
3. Un biólogo probablemente contestaría la pregunta que se ha hecho por generaciones de "¿qué es la vida?", diciendo que es "la capacidad para autorreproducirse". ¿Estás de acuerdo con esa definición? Si es así, ¿por qué? Si no estás de acuerdo, ¿cómo definirías la vida en términos biológicos?
4. Las definiciones tradicionales del ser humano han puesto énfasis en "la singularidad de los seres humanos" porque poseemos un idioma y utilizamos herramientas. Pero la mayoría de los animales se comunican con otros individuos de maneras complejas, y muchos vertebrados usan herramientas para realizar tareas. Por un momento supón que eres biólogo del planeta Marte y escribe una descripción taxonómica de la especie *Homo sapiens*.
5. Las extinciones han ocurrido a lo largo de toda la historia de la vida sobre la Tierra. ¿Por qué deberíamos preocuparnos si los seres humanos estamos causando actualmente una extinción en masa?
6. Las hipótesis del "remplazo africano" y el "origen multirregional" de la evolución del *Homo sapiens* hacen una predicción contrastante acerca del alcance y la naturaleza de la divergencia genética entre las razas humanas. Una de ellas predice que las razas son antiguas y altamente diversificadas genéticamente; la otra predice que las razas son jóvenes y poco diversificadas genéticamente. ¿Qué datos te ayudarían a determinar cuál hipótesis está más próxima a la verdad?
7. En términos biológicos, ¿cuál piensas que fue el suceso más significativo en la historia de la vida? Explica tu respuesta.

PARA MAYOR INFORMACIÓN

De Duve, C. "The Birth of Complex Cells". *Scientific American,* abril de 1996. Descripción narrativa del origen de las células eucarióticas complejas en casos repetidos de endosimbiosis.

Fry, I. *The Emergence of Life on Earth: A Historical and Scientific Overview.* Brunswick, NJ: Rutgers University Press, 2000. Un repaso completo de la investigación y las hipótesis sobre el origen de la vida.

Maynard Smith, J. y Szathmary, E. *The Origins of Life: From the Birth of Life to the Origin of Language.* Nueva York: Oxford Univesrsity Press, 1999. Una revisión que estimula el pensamiento sobre los principales cambios que han ocurrido durante 3500 millones de años en la historia de la vida.

Monastersky, R. "The Rise of Life on Earth". *National Geographic*, marzo de 1998. Una descripción cautivadora y bellamente ilustrada sobre las ideas y la evidencia actuales acerca de cómo surgió la vida.

Morwood, M., Sutkina, T. y Roberts, R. "The People Time Forgot". *National Geographic*, abril de 2005. Un relato del descubrimiento del *Homo floresiensis* y las implicaciones del hallazgo, escrito por los paleontólogos que realizaron el descubrimiento.

Tattersall, I. "Once We Were Not Alone". *Scientific American,* enero de 2000. Un panorama general de la historia evolutiva que condujo al moderno *Homo sapiens,* con ilustraciones de algunos de los homínidos que nos antecedieron.

Ward, P. D. *The End of Evolution*: *On Mass Extinctions and the Preservation of Biodiversity.* Nueva York: Bantam Books, 1994. Un relato cautivador en primera persona de la investigación de un paleontólogo sobre las causas de la extinción masiva.

Zimmer, C. "What Came Before DNA". *Discover*, junio de 2004. Una visión general de la investigación reciente sobre la evolución prebiótica.

CAPÍTULO

18 Sistemática: Búsqueda de orden en medio de la diversidad

Los biólogos que estudian la historia evolutiva del virus de la inmunodeficiencia humana tipo 1 (VIH-1) descubrieron que este virus, causante del SIDA, probablemente se originó en los chimpancés.

DE UN VISTAZO

ESTUDIO DE CASO: El origen de un asesino

18.1 ¿Cómo se nombran y clasifican los organismos?

Cada especie tiene un nombre único constituido por dos elementos

La clasificación se originó como una jerarquía de categorías

Los sistemáticos identifican las características que revelan las relaciones evolutivas

La anatomía desempeña un papel clave en la sistemática

Las semejanzas moleculares también son útiles para reconstruir la filogenia

18.2 ¿Cuáles son los dominios de la vida?

El sistema de cinco reinos mejoró los esquemas de clasificación

El sistema de tres dominios refleja con más precisión la historia de la vida

La clasificación en términos de reinos aún no está totalmente establecida

De cerca: Reconstrucción de los árboles filogenéticos

18.3 ¿Por qué cambian las clasificaciones?

La designación de las especies cambia cuando se descubre nueva información

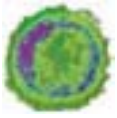
La definición de especie biológica en ocasiones es difícil o imposible de aplicar

Investigación científica: La genética molecular pone al descubierto las relaciones evolutivas

18.4 ¿Cuántas especies existen?

Enlaces con la vida: Un mundo pequeño

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO
El origen de un asesino



ESTUDIO DE CASO EL ORIGEN DE UN ASESINO

UNA DE LAS ENFERMEDADES más aterradoras del mundo es también una de las más misteriosas. El síndrome de inmunodeficiencia adquirida (SIDA) surgió aparentemente de la nada, y cuando se le reconoció por primera vez en los inicios de la década de 1980, nadie sabía cuál era su causa ni de dónde provenía. Los científicos compitieron para resolver el misterio y, al cabo de unos años, identificaron el virus de la inmunodeficiencia humana (VIH) como el agente infeccioso causante del SIDA. Una vez identificado el VIH, la atención de los investigadores se volcó hacia la cuestión de su origen.

Para encontrar la fuente del VIH fue necesario aplicar un enfoque evolutivo. Preguntar de dónde proviene el VIH en realidad equivale a preguntar qué clase de virus fue su antecesor. Los biólogos que examinan los asuntos relacionados con la ascendencia reciben el nombre de sistemáticos, quienes buscan establecer categorías de organismos de acuerdo con su historia evolutiva, así como construir clasificaciones que reflejen con precisión la estructura del árbol de la vida. Cuando un sistemático llega a la conclusión de que dos especies están estrechamente emparentadas, significa que ambas comparten un ancestro común reciente a partir del cual evolucionaron.

Los sistemáticos que exploraron la ascendencia del VIH descubrieron que sus parientes más cercanos no se encuentran entre los demás virus que infectan a los seres humanos, sino entre los que infectan a los monos y antropoides. De hecho, las investigaciones más recientes acerca de la historia evolutiva del VIH han permitido concluir que el pariente más cercano del VIH-1 (el tipo de VIH que es el causante principal de la epidemia mundial de SIDA) es una cepa viral que infecta a una subespecie particular de chimpancé que habita en espacios limitados de África occidental. Así pues, el antepasado del virus que ahora conocemos como VIH-1 no evolucionó a partir de un virus ya existente que atacaba a los humanos, sino que de alguna manera debió saltar de los chimpancés de África occidental a los seres humanos.

18.1 ¿CÓMO SE NOMBRAN Y CLASIFICAN LOS ORGANISMOS?

La **sistemática** es la ciencia que estudia la reconstrucción de la **filogenia**, o historia evolutiva. Como parte de sus esfuerzos por descubrir el árbol de la vida, los sistemáticos dan nombre a los organismos y los clasifican en categorías sobre la base de sus relaciones evolutivas. Existen ocho categorías principales: **dominio**, **reino**, **filum**, **clase**, **orden**, **familia**, **género** y **especie**. Estas categorías forman una jerarquía de nichos, en la que cada nivel incluye todos los demás niveles que están por debajo de él. Cada dominio contiene muchos reinos, cada reino contiene muchos filum (a menudo se utiliza el término *fila* como plural), cada filum incluye muchas clases, cada clase incluye muchos órdenes, y así sucesivamente. Conforme se desciende en la jerarquía, se incluyen grupos cada vez más reducidos. En otras palabras, las categorías se van haciendo más estrechas y especifican un grupo cuyo ancestro común es más reciente conforme se desciende. La tabla 18-1 incluye algunos ejemplos de clasificación de organismos específicos.

Cada especie tiene un nombre único constituido por dos elementos

El **nombre científico** de un organismo se forma a partir de las dos categorías más reducidas: el género y la especie. Cada género incluye un grupo de especies muy estrechamente emparentadas, y cada especie de un género incluye poblaciones de organismos que en principio se pueden cruzar en condiciones naturales. Así, por ejemplo, el género *Sialia* (azulejos) incluye el azulejo oriental *(Sialia sialis),* el azulejo occidental *(Sialia mexicana)* y el azulejo de las montañas *(Sialia currucoides)*; todos ellos son pájaros muy semejantes que normalmente no se cruzan (FIGURA 18-1).

Cada nombre científico compuesto de dos elementos es único, por lo que al hacer referencia a un organismo por su nombre científico se elimina cualquier posibilidad de ambigüedad o confusión. Por ejemplo, el ave *Gavia immer* se conoce comúnmente en Norteamérica como somorgujo, en Gran Bretaña como colimbo del norte, y recibe muchos otros nombres en los idiomas de los distintos países donde habita. Pero los biólogos de todo el mundo reconocen el nombre científico en latín *Gavia immer*, con lo cual se superan las barreras del idioma y se hace posible una comunicación precisa.

Hay que advertir que, por convención, los nombres científicos siempre se escriben subrayados o en *cursivas.* La primera letra del nombre del género siempre es mayúscula, y la primera letra del nombre de la especie, minúscula. Nunca se usa sólo el nombre de la especie, sino que siempre va acompañado del nombre de su género.

La clasificación se originó como una jerarquía de categorías

Aristóteles (384-322 a. C.) fue de los primeros en tratar de formular un lenguaje lógico y estandarizado para nombrar a los seres vivos. Sobre la base de características como la complejidad estructural, el comportamiento y el grado de desarrollo al nacer, Aristóteles clasificó alrededor de 500 organismos en 11 categorías. Las categorías de Aristóteles formaban una estructura jerárquica, en la que cada categoría era más incluyente que la ubicada debajo de ella, un concepto que se sigue aplicando en la actualidad.

Tomando como base el trabajo de Aristóteles, y más de 2000 años más tarde, el naturalista sueco Carl von Linné o Carlos Linneo (1707-1778) —quien se llamaba a sí mismo Carolus Linnaeus, una versión latinizada de su nombre— puso los cimientos del sistema moderno de clasificación. Linneo colocó cada organismo en una serie de categorías dispuestas jerárquicamente sobre la base de su semejanza con otras formas de vida, y también introdujo el nombre científico compuesto de género y especie.

Casi 100 años más tarde, Charles Darwin (1809-1882) publicó *El origen de las especies,* donde demostró que todos los organismos están emparentados por un ancestro común. Los biólogos comenzaron entonces a reconocer que las categorías deberían reflejar las líneas del parentesco evolutivo entre los organismos. Cuanto mayor es el número de categorías que dos organismos comparten, más cercana es su relación evolutiva.

Los sistemáticos identifican las características que revelan las relaciones evolutivas

Los sistemáticos se proponen reconstruir el árbol de la vida, pero deben hacerlo sin mucho conocimiento directo de la historia evolutiva. Puesto que no pueden mirar al pasado, deben deducirlo en la medida de lo posible, sobre la base de las similitudes que presentan los organismos vivos. Sin embargo, no todas las semejanzas resultan útiles, ya que algunas se deben a una evolución convergente de organismos que no están estrechamente emparentados y, por consiguiente, no ayudan a inferir la historia evolutiva. En cambio, los sistemáticos valo-

Tabla 18-1 Clasificación de algunos organismos, en la que se refleja su grado de parentesco*

	Ser humano	Chimpancé	Lobo	Mosca de la fruta	Secoya	Girasol
Dominio	**Eukarya**	**Eukarya**	**Eukarya**	**Eukarya**	**Eukarya**	**Eukarya**
Reino	**Animalia**	**Animalia**	**Animalia**	**Animalia**	**Plantae**	**Plantae**
Filum	**Chordata**	**Chordata**	**Chordata**	Arthropoda	Coniferophyta	Anthophyta
Clase	**Mammalia**	**Mammalia**	**Mammalia**	Insecta	Coniferosida	Dicotyledoneae
Orden	**Primates**	**Primates**	Carnivora	Diptera	Coniferales	Asterales
Familia	Hominidae	Pongidae	Canidae	Drosophilidae	Taxodiaceae	Asteraceae
Género	*Homo*	*Pan*	*Canis*	*Drosophila*	*Sequoiadendron*	*Helianthus*
Especie	*sapiens*	*troglodytes*	*lupus*	*melanogaster*	*giganteum*	*annuus*

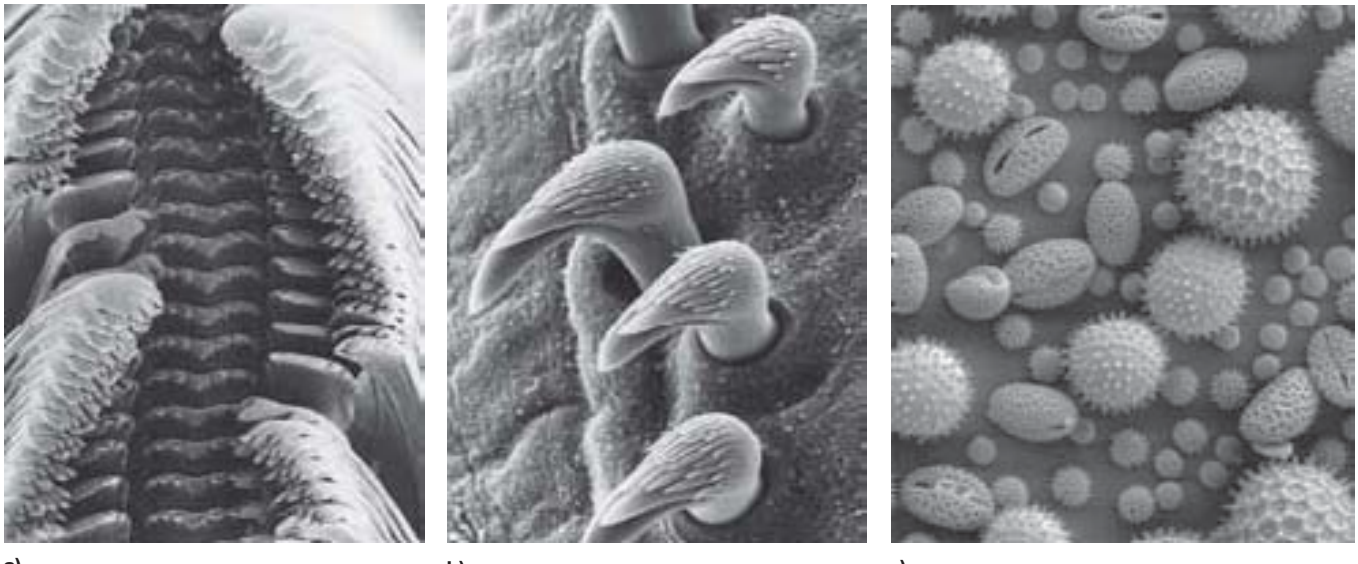
*Las categorías en negritas son aquellas que comparten dos o más de los organismos clasificados.
Los nombres de géneros y especies siempre se escriben en cursivas o se subrayan.

FIGURA 18-1 Tres especies de azulejo
Pese a sus evidentes semejanzas, estas tres especies de azulejo se conservan distintas porque no se cruzan. Las tres especies que se muestran son (de izquierda a derecha) el azulejo oriental (*Sialia sialis*), el azulejo occidental (*Sialia mexicana*) y el azulejo de las montañas (*Sialia currucoides*).

ran las semejanzas que surgen cuando dos clases de organismos comparten una característica porque ambos la han heredado de un ancestro común. Por eso, una de las tareas principales del sistemático es distinguir entre las similitudes informativas que se deben a un ancestro común y las semejanzas menos útiles que son el resultado de una evolución convergente. En su búsqueda de similitudes informativas, los biólogos examinan características de muy diversa índole.

La anatomía desempeña un papel clave en la sistemática

Históricamente, las características distintivas más importantes y útiles han sido las anatómicas. Los sistemáticos examinan detenidamente las similitudes en cuanto a la estructura corporal externa (véase la figura 18-1) y en cuanto a las estructuras internas, como el esqueleto y los músculos. Por ejemplo, las estructuras homólogas, como los huesos dactilares de delfines, murciélagos, focas y seres humanos (véase la figura 14-7) son indicio de un ancestro común. Con el fin de identificar las relaciones entre especies más estrechamente emparentadas, los biólogos utilizan el microscopio para discernir detalles más finos: el número y forma de los "dentículos" de la rádula con aspecto de lengua de un caracol, la forma y posición de las cerdas de un gusano marino o la estructura externa de los granos de polen de una planta en floración (**FIGURA 18-2**).



a) b) c)

FIGURA 18-2 Las estructuras microscópicas ayudan a clasificar los organismos
a) Los "dentículos" de la rádula con aspecto de lengua de un caracol (una estructura que utiliza para alimentarse), ***b)*** las cerdas de un gusano marino y ***c)*** la forma y las características superficiales de los granos de polen son rasgos potencialmente útiles para hacer la clasificación. Tales estructuras finamente detalladas revelan similitudes entre especies que no son evidentes en estructuras más grandes y visibles.

Las semejanzas moleculares también son útiles para reconstruir la filogenia

Las características anatómicas que comparten organismos emparentados son expresiones de semejanzas genéticas subyacentes, por lo que es razonable esperar que las relaciones evolutivas entre las especies también se reflejen en semejanzas genéticas. Por desgracia, las comparaciones genéticas directas no fueron posibles durante la mayor parte de la historia de la biología. Sin embargo, a partir de la década de 1980, los avances en las técnicas de genética molecular han puesto en marcha una revolución en los estudios de las relaciones evolutivas.

Como resultado de estos avances técnicos, los sistemáticos actuales tienen la posibilidad de usar la secuencia de nucleótidos del DNA (es decir, el genotipo) para investigar el parentesco entre diferentes tipos de organismos. Las especies estrechamente emparentadas tienen secuencias similares de DNA. En algunos casos, la semejanza de las secuencias de DNA se verá reflejada en la estructura de los cromosomas. Por ejemplo, tanto las secuencias de DNA como los cromosomas de los chimpancés y los seres humanos son sumamente parecidos, lo que demuestra que estas dos especies están estrechamente emparentadas (**FIGURA 18-3**). Algunos de los métodos y descubrimientos fundamentales del análisis genético se examinan en la sección "Investigación científica: La genética molecular pone al descubierto las relaciones evolutivas". El proceso por el que los sistemáticos usan las semejanzas genéticas y anatómicas para reconstruir la hisoria evolutiva se analiza en "De cerca: Reconstrucción de los árboles filogenéticos".

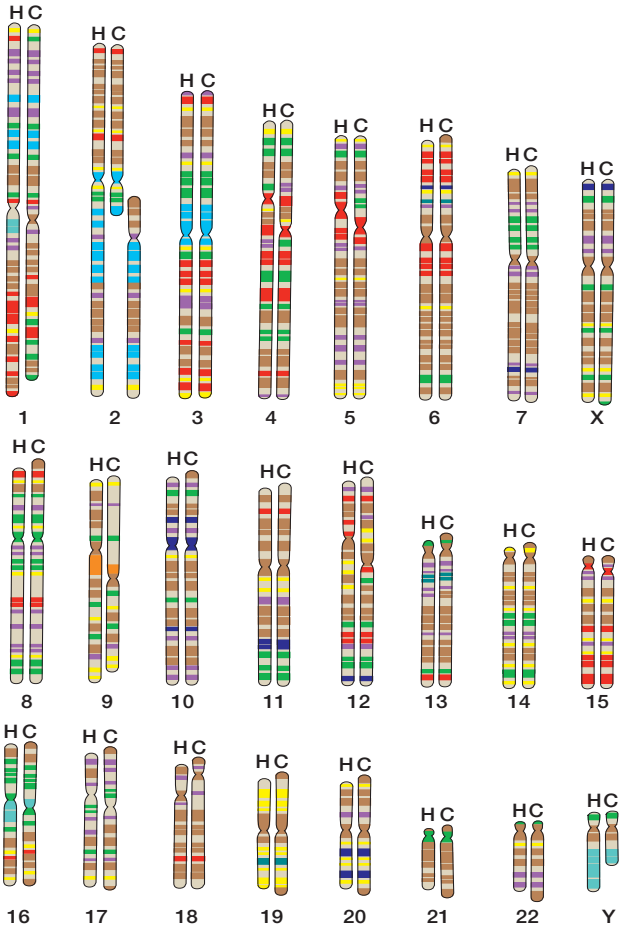


FIGURA 18-3 Los cromosomas de los seres humanos y de los chimpancés son similares
Los cromosomas de especies diferentes se comparan por medio de la distribución de bandas que se hace visible por tinción. La comparación que se ilustra aquí, entre cromosomas humanos (miembro izquierdo de cada par; H) y cromosomas de chimpancé (C), indica que las dos especies son muy similares genéticamente. De hecho, se ha determinado la secuencia de los genomas completos de ambas especies y son idénticos en un 96 por ciento. El sistema de numeración que se muestra es el que se utiliza en los cromosomas humanos; observa que el cromosoma 2 humano corresponde a una combinación de dos cromosomas de chimpancé.

18.2 ¿CUÁLES SON LOS DOMINIOS DE LA VIDA?

Antes de 1970, todas las formas de vida se clasificaban en dos reinos: Animalia y Plantae. Se consideraba a todas las bacterias, hongos y eucariotas fotosintéticos como plantas, y todos los demás organismos se clasificaban como animales. Sin embargo, conforme los científicos aprendían más acerca de los hongos y los microorganismos, se hizo evidente que el sistema de dos reinos simplificaba en exceso la verdadera naturaleza de la historia evolutiva. Para contribuir a corregir este problema, Robert H. Whittaker propuso en 1969 un esquema de clasificación de cinco reinos que fue adoptado finalmente por casi todos los biólogos.

El sistema de cinco reinos mejoró los esquemas de clasificación

El sistema de cinco reinos de Whittaker coloca a todos los organismos procarióticos en un solo reino y divide a los eucariotas en cuatro reinos. La designación de un reino aparte (llamado Monera) para los organismos procarióticos reflejó el reconocimiento de que la trayectoria evolutiva de estos organismos diminutos y unicelulares había divergido de los eucariotas muy temprano en la historia de la vida. Entre los eucariotas, el sistema de cinco reinos reconoció tres reinos de organismos multicelulares (Plantae, Fungi y Animalia) y colocó a todos los restantes, la mayoría de los cuales son eucariotas unicelulares, en un solo reino (Protista).

El sistema de cinco reinos, en tanto que refleja con más exactitud nuestro conocimiento de la historia evolutiva, constituyó un avance respecto al antiguo sistema de dos reinos. Sin embargo, conforme nuestro conocimiento aumenta, se vuelve necesario modificar nuestra perspectiva de las categorías más fundamentales de la vida. La obra innovadora del biólogo Carl Woese demuestra que los biólogos pasaron por alto un suceso fundamental en la historia primitiva de la vida, el cual demanda una nueva y más exacta clasificación.

El sistema de tres dominios refleja con más precisión la historia de la vida

Woese y otros biólogos interesados en la historia evolutiva de los microorganismos han estudiado la bioquímica de los orga-

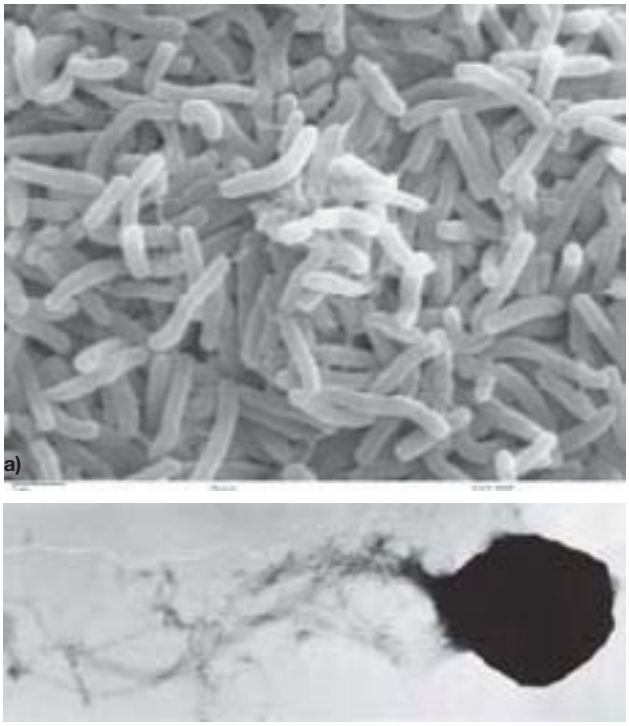


FIGURA 18-4 Dos dominios de organismos procarióticos
Aunque de apariencia similar, ***a)*** *Vibrio cholerae* y ***b)*** *Methanococcus jannaschi* tienen un parentesco más lejano que el que existe entre el champiñón y el elefante. *Vibrio* pertenece al dominio Bacteria y *Methanococcus*, al dominio Archaea.

nismos procarióticos. Estos investigadores, concentrando su atención en las secuencias de nucleótidos del RNA presente en los ribosomas, establecieron que lo que hasta entonces se había considerado como el reino Monera se compone en realidad de dos clases muy diferentes de organismos. Woese dio a estos dos grupos los nombres de Bacteria y Archaea (**FIGURA 18-4**).

Pese a las semejanzas superficiales en cuanto a su apariencia bajo el microscopio, el grupo Bacteria y el Archaea son radicalmente diferentes. Los integrantes de estos dos grupos no tienen un parentesco más cercano entre sí que el que tienen con cualquier eucariota. El árbol de la vida se dividió en tres partes muy al principio de la historia de la vida, mucho antes de que se originaran las plantas, los animales y los hongos. Como resultado de esta nueva comprensión, el sistema de cinco reinos se remplazó por una clasificación que divide la vida en tres dominios: **Bacteria**, **Archaea** y **Eukarya** (**FIGURA 18-5**).

La clasificación en términos de reinos aún no está totalmente establecida

El cambio a un sistema de tres dominios hizo indispensable que los sistemáticos reexaminaran los reinos dentro de cada dominio, y el proceso de establecer tales reinos aún no concluye. Si aceptamos que las considerables diferencias entre plantas, animales y hongos demandan que cada uno de estos linajes evolutivos conserve su estatus de reino, entonces la lógica de clasificación requiere también que asignemos el estatus de reino a grupos que se derivaron del árbol de la vida antes que estos tres grupos de eucariotas pluricelulares. Siguiendo esta lógica, los sistemáticos reconocen unos 15 reinos entre el dominio Bacteria y tres o más entre el Archaea. Los sistemáticos también reconocen reinos adicionales dentro del dominio Eukarya, lo que refleja un número de divisiones evolutivas muy tempranas dentro del conjunto diverso de eucariotas unicelulares antes agrupados en el reino Protista. Sin embargo, los sistemáticos aún tienen que llegar a un consenso en torno a las definiciones precisas de los nuevos reinos procariota y eucariota, aunque está surgiendo nueva información acerca de la historia evolutiva de los organismos unicelulares. De manera que la clasificación a nivel de reinos se encuentra en un estado de transición, en tanto que los sistemáticos tratan de incorporar la información más reciente.

Las descripciones de este libro acerca de la diversidad de la vida —que aparecen en los capítulos 19 a 24— esquivan el estado aún no definitivo de los reinos de la vida. Los dominios procariotas Archaea y Bacteria se explican sin hacer referencia a las relaciones a nivel de reinos. Los hongos, las plantas y los animales, entre los eucariotas, se consideran unidades evolutivas distintas y el término genérico "protista" designa el conjunto diverso de eucariotas que no son miembros de estos

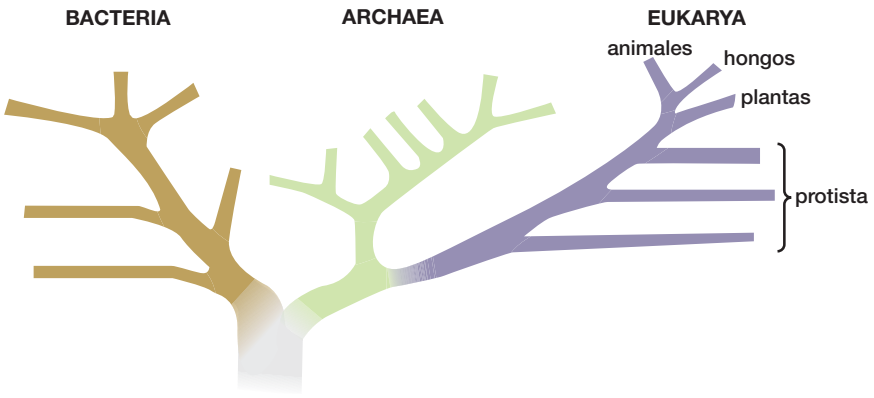


FIGURA 18-5 El árbol de la vida
Los tres dominios de la vida representan las "ramas" más primitivas de la historia evolutiva.

DE CERCA Reconstrucción de los árboles filogenéticos

Los sistemáticos están empeñados en desarrollar un sistema de clasificación que refleje la filogenia (es decir, la historia evolutiva) de los organismos. De ahí que su principal tarea sea reconstruir la filogenia. Reconstruir la historia evolutiva de todos los organismos que habitan la Tierra es, desde luego, una tarea colosal, así que cada sistemático, por lo general, elige trabajar con una porción específica de la historia.

El resultado de una reconstrucción filogenética generalmente se representa en un diagrama. Estos diagramas pueden adoptar diversas formas, pero todos muestran la secuencia de los eventos de ramificación a partir de los cuales las especies ancestrales dieron origen a las especies descendientes. Por esta razón, los diagramas de filogenia normalmente tienen forma de árbol.

Estos árboles representan la filogenia de cualquier conjunto de taxa (el singular es taxón) específicos. Un taxón es una especie con nombre, como *Homo sapiens*, o un grupo de especies con nombre, como los primates, los escarabajos o los helechos. Así que los árboles filogenéticos permiten mostrar la historia evolutiva a diferentes niveles. Por ejemplo, los sistemáticos podrían reconstruir un árbol de 10 especies comprendidas en un género particular de almejas o un árbol de 25 filum de animales o un árbol de tres dominios de la vida.

Después de seleccionar los taxa que se van a incluir, un sistemático está listo para comenzar a construir el árbol. La mayoría de los sistemáticos utilizan el enfoque *cladístico* para reconstruir árboles filogenéticos. De acuerdo con este enfoque, las relaciones entre taxa se ponen de manifiesto mediante la presencia de semejanzas conocidas como *sinapomorfias*. Una sinapomorfia es una característica similar en dos o más taxa porque éstos heredaron una versión "derivada" del rasgo que se modificó a partir de su estado original en un ancestro común. La formación de sinapomorfias se ilustra en la **FIGURA E18-1**.

En el escenario hipotético que se ilustra en la figura E18-1, podemos identificar fácilmente las sinapomorfias porque conocemos el estado ancestral de la característica y los cambios posteriores que tuvieron lugar. Sin embargo, en la vida real, los sistemáticos no tienen conocimiento directo del ancestro, que vivió en el pasado remoto y cuya identidad se desconoce. Sin este conocimiento directo, un sistemático que observa una semejanza entre dos taxa se enfrenta a un desafío. ¿La semejanza observada es una sinapomorfia o tiene alguna otra causa, como la evolución convergente o la herencia común del estado ancestral? El enfoque cladístico provee técnicas para identificar las sinapomorfias, pero la posibilidad de una interpretación errónea subsiste. Para evitar que surjan problemas al identificar equivocadamente las sinapomorfias, los sistemáticos emplean numerosas características al construir un árbol, con lo que reducen al mínimo la influencia de cualquiera de los rasgos individuales.

En la última fase del proceso de construcción de un árbol, el sistemático compara diferentes árboles posibles. Por ejemplo, tres taxa pueden ordenarse en tres diferentes patrones de ramificación (**FIGURA E18-2**). Cada patrón de ramificación representa una hipótesis diferente acerca de la historia evolutiva de los taxa A, B y C. Imagina, por ejemplo, que el sistemático identifica varias sinapomorfias que vinculan a los taxa A y B, pero que no se presentan en el taxón C; además, ha encontrado sólo algunas sinapomorfias que vinculan al taxón B con el C o al taxón A con el C. En este caso, el árbol 1 representa la hipótesis con más fundamento.

Con grandes cantidades de taxa, el número de posibles árboles crece considerablemente. De manera similar, un gran número de características también complica el trabajo de identificar el árbol que se fundamenta más en los datos. Sin embargo, por fortuna, los sistemáticos han desarrollado programas de cómputo complejos que les ayudan a lidiar con estas dificultades.

De acuerdo con el enfoque cladístico, los árboles filogenéticos desempeñan un papel clave en la clasificación. Cada grupo

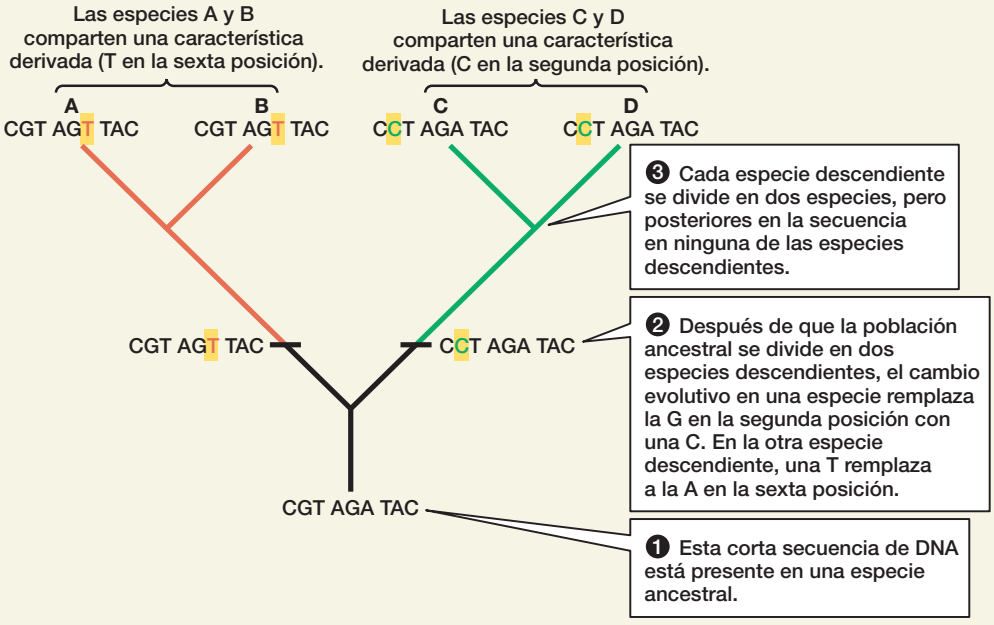

Las especies A y B comparten una característica derivada (T en la sexta posición).
Las especies C y D comparten una característica derivada (C en la segunda posición).
A
B
C
D
CGT AGT TAC
CGT AGT TAC
CCT AGA TAC
CCT AGA TAC
❸ Cada especie descendiente se divide en dos especies, pero posteriores en la secuencia en ninguna de las especies descendientes.
CGT AGT TAC
CCT AGA TAC
❷ Después de que la población ancestral se divide en dos especies descendientes, el cambio evolutivo en una especie remplaza la G en la segunda posición con una C. En la otra especie descendiente, una T remplaza a la A en la sexta posición.
CGT AGA TAC
❶ Esta corta secuencia de DNA está presente en una especie ancestral.

FIGURA E18-1 Los taxa emparentados se vinculan mediante características derivadas compartidas (sinapomorfias)
Una característica derivada es aquella que se ha modificado a partir de la versión ancestral del rasgo. Cuando dos o más taxa comparten una característica derivada, se dice que el rasgo compartido es una sinapomorfia. El escenario hipotético que se ilustra aquí muestra cómo surgen las sinapomorfias.

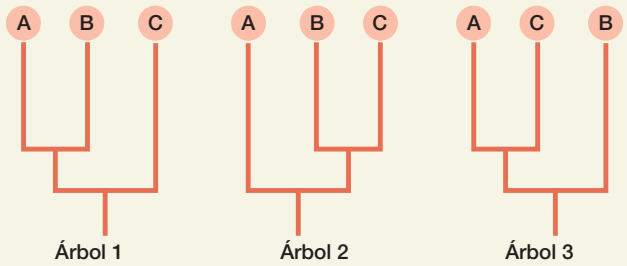


FIGURA E18-2 Los tres posibles árboles para tres taxa

designado en una clasificación sólo debe contener los organismos que están más estrechamente emparentados entre sí que con cualquier otro organismo fuera del grupo. De esta manera, por ejemplo, los miembros de la familia Canidae (que incluye perros, lobos, zorros y coyotes) están más estrechamente emparentados entre sí que con cualquier miembro de otra familia. Otra forma de enunciar este principio es decir que cada grupo designado debe contener *todos* los descendientes vivos de un antepasado común (**FIGURA E18-3a**). En la terminología de la sistemática cladística se dice que tales grupos son *monofiléticos*.

Algunos nombres, especialmente aquellos que se acuñaron antes del enfoque cladístico, designan grupos que contienen algunos de los descendientes, pero no todos, de un antepasado común. Tales grupos son *parafiléticos*. Un grupo parafilético bien conocido es el de los reptiles (**FIGURA E18-3b**). Como se definen históricamente, los reptiles excluyen a las aves, las cuales, ahora se sabe, pertenecen directamente al árbol de la familia de los reptiles. Por consiguiente, los reptiles no incluyen todos los descendientes vivos del antepasado común que dio origen a las serpientes, lagartos, tortugas, cocodrilos y aves. Por eso, los sistemáticos preferirían dejar a un lado la antigua clase Reptilia y utilizar un esquema que nombre sólo los grupos monofiléticos. Sin embargo, es probable que la palabra "reptiles" se quede con nosotros todavía durante algún tiempo, en tanto que mucha gente está acostumbrada a utilizarlo (incluidos los sistemáticos). Después de todo, el término constituye una forma conveniente de describir un grupo de animales que comparten algunas adaptaciones interesantes, aun cuando ese grupo no sea monofilético.

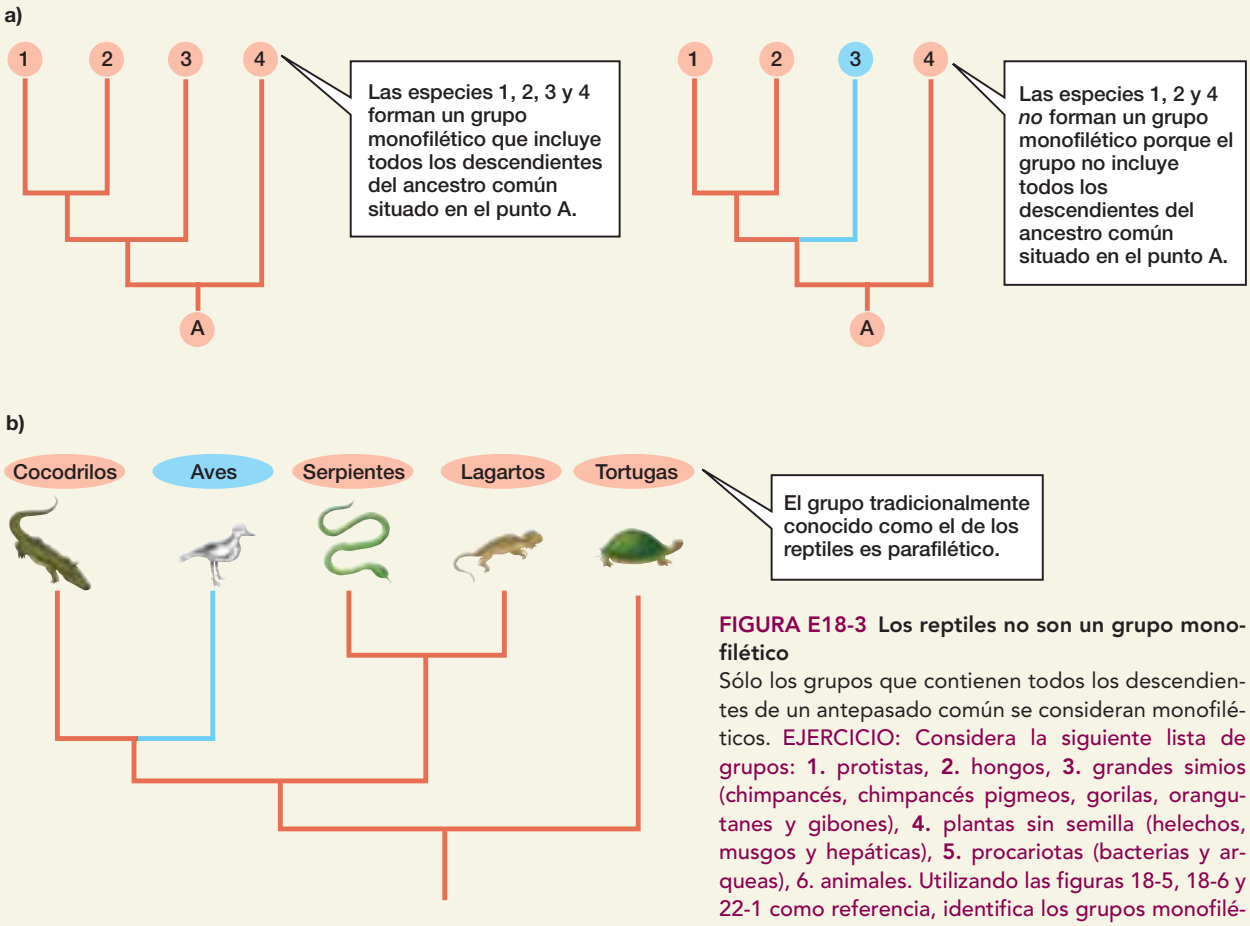

a)
1
2
3
4
A
Las especies 1, 2, 3 y 4 forman un grupo monofilético que incluye todos los descendientes del ancestro común situado en el punto A.
1
2
3
4
A
Las especies 1, 2 y 4 *no* forman un grupo monofilético porque el grupo no incluye todos los descendientes del ancestro común situado en el punto A.
b)
Cocodrilos
Aves
Serpientes
Lagartos
Tortugas
El grupo tradicionalmente conocido como el de los reptiles es parafilético.

FIGURA E18-3 Los reptiles no son un grupo monofilético

Sólo los grupos que contienen todos los descendientes de un antepasado común se consideran monofiléticos. EJERCICIO: Considera la siguiente lista de grupos: **1.** protistas, **2.** hongos, **3.** grandes simios (chimpancés, chimpancés pigmeos, gorilas, orangutanes y gibones), **4.** plantas sin semilla (helechos, musgos y hepáticas), **5.** procariotas (bacterias y arqueas), 6. animales. Utilizando las figuras 18-5, 18-6 y 22-1 como referencia, identifica los grupos monofiléticos en la lista.

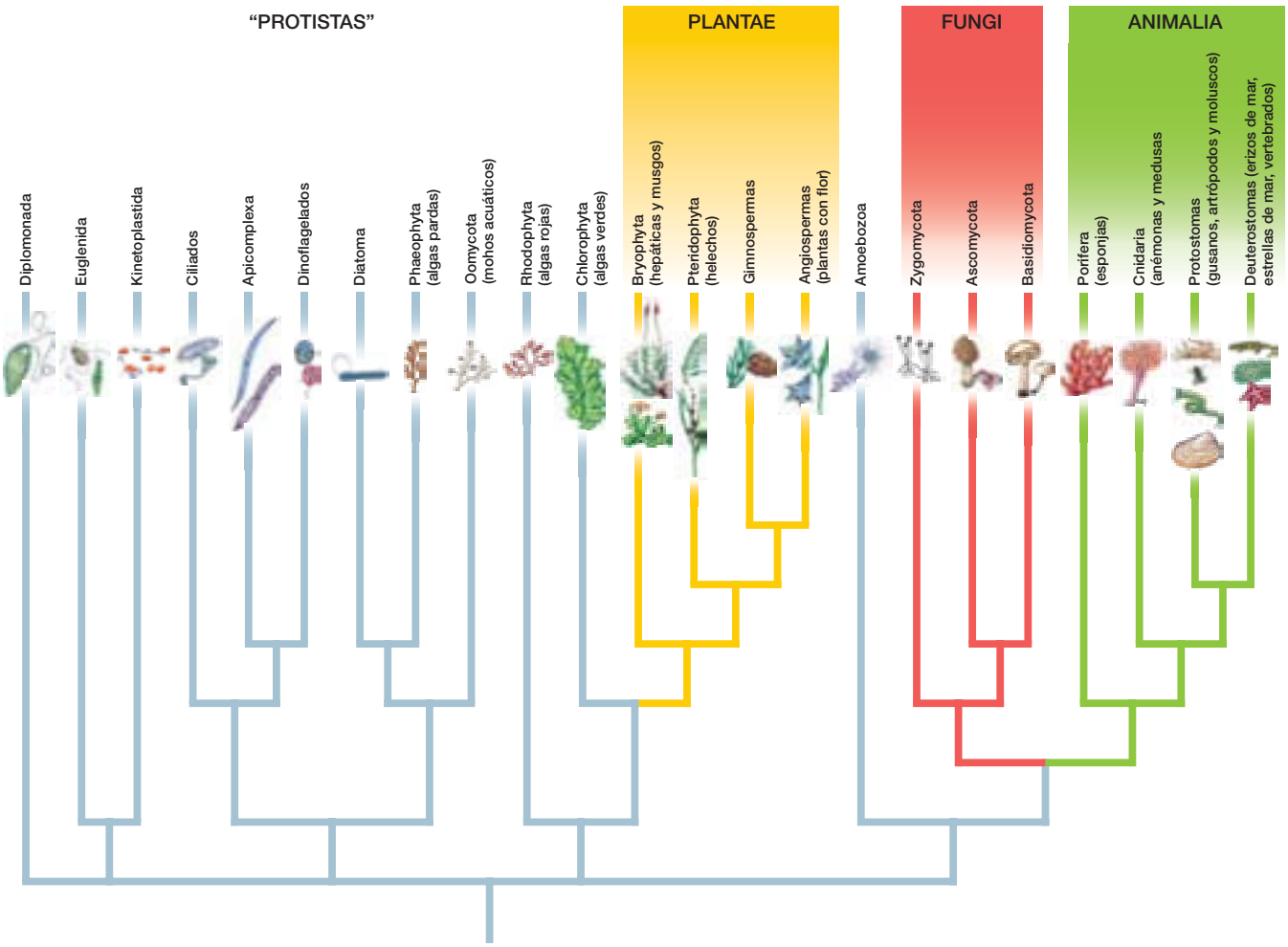


FIGURA 18-6 El árbol eucariótico de la vida en detalle
Aquí se muestran algunos de los principales linajes evolutivos dentro del dominio Eukarya. El término "protista" se refiere a los numerosos eucariotas que no son plantas ni animales ni tampoco hongos.

tres reinos. La FIGURA 18-6 muestra las relaciones evolutivas entre algunos miembros del dominio Eukarya.

18.3 ¿POR QUÉ CAMBIAN LAS CLASIFICACIONES?

Como lo demuestra el surgimiento del sistema de tres dominios, las hipótesis de relaciones evolutivas que son la base de la clasificación están sujetas a revisión conforme surgen nuevos datos. Incluso los dominios y reinos, que representan ramificaciones antiguas y profundas del árbol de la vida, en ocasiones deben modificarse. Los cambios de este tipo en los niveles superiores de clasificación se producen sólo raras veces, pero en el otro extremo de la clasificación jerárquica, entre las designaciones de las especies, las revisiones son más frecuentes.

La designación de las especies cambia cuando se descubre nueva información

Conforme los investigadores descubren nueva información, los sistemáticos por lo regular proponen cambios en la clasificación en el nivel de las especies. Por ejemplo, todavía hasta hace poco, los sistemáticos reconocían dos especies de elefantes: el africano y el asiático. Ahora, sin embargo, reconocen tres especies de elefantes; el que antes se conocía como elefante africano ahora se divide en dos especies: el elefante de la sabana y el elefante de la selva. ¿A qué se debe el cambio? El análisis genético de los elefantes en África reveló que hay poco flujo de genes entre los elefantes que habitan en la selva y los que viven en la sabana. Los dos grupos no son más parecidos genéticamente que los leones y los tigres.

La definición de especie biológica en ocasiones es difícil o imposible de aplicar

En ciertos casos, los sistemáticos se encuentran ante la imposibilidad de afirmar con certeza dónde termina una especie y dónde comienza otra. Como señalamos en el capítulo 16, los organismos de reproducción asexual plantean una dificultad especial para los sistemáticos, porque el criterio de cruza (la base de la definición de "especie biológica" que hemos utilizado en este texto) no sirve para distinguir entre las especies. Lo inoperante de este criterio en los estudios de organismos asexuales deja amplio espacio para el desacuerdo de los investigadores acerca de cuáles poblaciones asexuales constituyen una especie, sobre todo cuando se comparan grupos que

INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

La genética molecular pone al descubierto las relaciones evolutivas

La evolución es el resultado de la acumulación de cambios heredados en las poblaciones. Puesto que el DNA es la molécula de la herencia, los cambios evolutivos deben reflejarse necesariamente en cambios del DNA. Lo sistemáticos han sabido desde hace mucho tiempo que la comparación del DNA dentro de un grupo de especies sería un método muy poderoso para inferir las relaciones evolutivas, pero el acceso directo a la información genética fue sólo un sueño durante casi toda la historia de la sistemática. Sin embargo, en la actualidad, la determinación de **secuencias de DNA**, es decir, el establecimiento de las secuencias de nucleótidos en los segmentos de DNA, es un procedimiento relativamente económico, fácil y ampliamente disponible. La *reacción en cadena de la polimerasa* (PCR; véase el capítulo 13) permite a los sistemáticos acumular con facilidad grandes muestras de DNA de organismos, y máquinas automatizadas hacen de la determinación de secuencias una tarea relativamente sencilla. Esta técnica se ha convertido rápidamente en una de las herramientas principales para conocer la filogenia.

La lógica en la que se fundamenta la sistemática molecular es sencilla. Se basa en la observación de que cuando una sola especie se divide en dos, la poza génica de cada especie resultante comienza a acumular mutaciones. Sin embargo, las mutaciones concretas de cada especie serán diferentes porque cada una evoluciona ahora de forma independiente, sin flujo de genes entre ambas. Conforme pasa el tiempo, se acumulan cada vez más diferencias genéticas. De esta forma, si un sistemático obtiene secuencias de DNA de representantes de ambas especies, puede comparar las secuencias de nucleótidos de las dos especies en cualquier punto dado del genoma. Un número menor de diferencias indica organismos más estrechamente emparentados.

Para poner en práctica los sencillos principios antes descritos, generalmente se necesita un razonamiento algo más refinado. Por ejemplo, la comparación de secuencias se vuelve mucho más compleja cuando un investigador se da a la tarea de evaluar las relaciones entre 20 o 30 especies. Por fortuna, los matemáticos y los programadores de computadoras han ideado algunos métodos muy ingeniosos para comparar un gran número de secuencias y deducir la filogenia que mejor explica las diferencias de secuencias observadas.

Los sistemáticos moleculares también deben tener cuidado al elegir el segmento de DNA cuya secuencia se establecerá. Las diversas partes del genoma evolucionan con diferente rapidez, y es muy importante analizar la secuencia de un segmento de DNA cuya rapidez de cambio concuerde con la cuestión filogenética que se esté tratando. En general, los genes de evolución lenta son los mejores para comparar organismos con parentesco lejano, y las partes del genoma que cambian con rapidez son las más idóneas para analizar relaciones más cercanas de parentesco. A veces resulta difícil localizar un gen individual que aporte la información suficiente para reproducir una imagen exacta del cambio evolutivo en todo el genoma, por lo que con frecuencia es indispensable examinar varios genes para construir filogenias confiables, como la que se ilustra en la **FIGURA E18-4**.

En la actualidad, los datos de secuencias se están acumulando con una rapidez sin precedentes, y los sistemáticos tienen acceso a secuencias de un número siempre creciente de especies. Se ha establecido ya la secuencia de los genomas completos de más de 180 especies, y se espera que este número llegue a 1000 en la próxima década. El Proyecto del Genoma Humano ha concluido, y nuestras secuencias de DNA ahora están disponibles en un registro público. La revolución de la biología molecular ha promovido un gran salto hacia delante en nuestro conocimiento de la historia evolutiva.

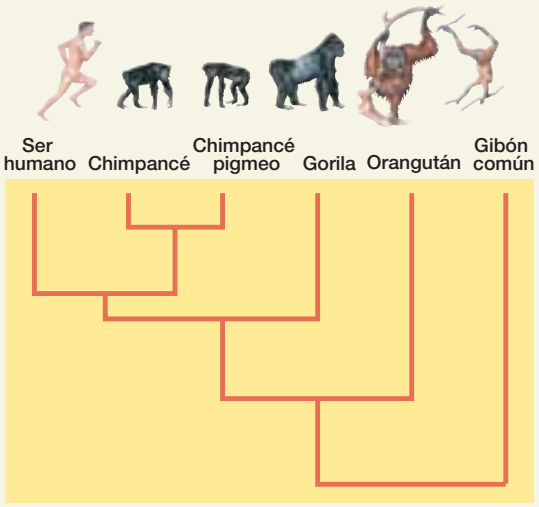


FIGURA E18-4 La comparación de secuencias de DNA permite establecer el parentesco
Este árbol evolutivo se dedujo a partir de las secuencias de nucleótidos de varios genes diferentes que son comunes a los seres humanos y a los antropoides.

tienen fenotipos similares. Por ejemplo, algunos sistemáticos reconocen 200 especies de zarzamora británica (una planta que produce semillas por partenogénesis, es decir, sin fecundación), pero otros reconocen sólo 20 especies.

La dificultad para aplicar la definición de especie biológica a los organismos asexuales constituye un serio problema para los sistemáticos. Después de todo, una fracción importante de los organismos de nuestro planeta se reproduce por medios no sexuales. Casi todas las bacterias, arqueas y protistas, por ejemplo, se reproducen asexualmente casi siempre. Algunos sistemáticos consideran que se necesita una definición de especie de aplicación más universal, que no excluya los organismos asexuales ni dependa del criterio de aislamiento reproductivo.

El concepto de especie filogenética ofrece una definición alternativa

Se han propuesto otras definiciones de especie a lo largo de la historia de la biología evolutiva, pero ninguna ha resultado lo suficientemente convincente como para desplazar la definición de especie biológica. No obstante, una definición alternativa ha ganado adeptos en años recientes. El *concepto de especie filogenética* define una especie como "el grupo diagnosticable más pequeño que contiene todos los descendientes

de un ancestro común". En otras palabras, si dibujamos un árbol evolutivo que describa la distribución de los ancestros entre un conjunto de organismos, cada rama definida del árbol constituye una especie diferente, independientemente de que los individuos representados por esa rama puedan cruzarse o no con individuos de otras ramas. Como se intuye, la aplicación rigurosa del concepto de especie filogenética haría aumentar considerablemente el número de especies diferentes reconocidas por los sistemáticos.

Los defensores y los críticos del concepto de especie filogenética se encuentran inmersos actualmente en un vigoroso debate acerca de su pertinencia. Quizá algún día el concepto de especie filogenética tomará el lugar del concepto de especie biológica como "definición de libro de texto" de la especie. Mientras tanto, el debate y la revisión de las clasificaciones proseguirán a medida que los sistemáticos conozcan cada vez mejor las relaciones evolutivas, en particular con la aplicación de técnicas derivadas de la biología molecular. Aunque todavía se nos escapa el conocimiento preciso de las relaciones evolutivas de muchos organismos, la clasificación resulta enormemente útil para ordenar nuestras ideas e investigaciones en torno a la diversidad de la vida en la Tierra.

18.4 ¿CUÁNTAS ESPECIES EXISTEN?

Los científicos ignoran, incluso en términos de un orden de magnitud, cuántas especies comparten nuestro mundo. Cada año, entre 7000 y 10,000 especies nuevas reciben un nombre, casi todas de insectos, y muchas de las cuales habitan en las selvas tropicales. El número total de especies con nombre es actualmente de alrededor de 1.5 millones. Sin embargo, muchos científicos piensan que tal vez existan entre 7 y 10 millones de especies, y algunas estimaciones alcanzan los 100 millones. Esta gama total de diversidad de especies se conoce como **biodiversidad**. De todas las especies que se han identificado hasta ahora, aproximadamente un 5 por ciento son procariotas y protistas. Otro 22 por ciento son plantas y hongos, y el resto son animales. Esta distribución tiene poco que ver con la abundancia real de tales organismos y mucho con su tamaño, su facilidad de clasificación, su accesibilidad y el número de científicos que los estudian. Históricamente, los sistemáticos han concentrado su atención sobre todo en los organismos grandes o llamativos de las regiones templadas, pero la biodiversidad es mayor entre los organismos pequeños y poco perceptibles de los trópicos. Además de las especies terrestres o que viven en aguas poco profundas a las que se ha prestado escasa atención, existe otro "continente" entero de especies, prácticamente inexplorado, en el lecho de los mares profundos. Sobre la base de las escasas muestras disponibles, los científicos estiman que tal vez residen ahí cientos de miles de especies desconocidas.

Aunque se han descrito y nombrado alrededor de 5000 especies de procariotas, gran parte de la diversidad procariótica queda aún sin explorar. Consideremos un estudio realizado por científicos noruegos, quienes analizaron el DNA con el objetivo de contar el número de especies de bacterias diferentes presentes en una pequeña muestra de suelo del bosque. Con el fin de distinguir las especies, los científicos definieron arbitrariamente el DNA bacteriano como proveniente de especies distintas si difería, al menos, en un 30 por ciento respecto a cualquier otro DNA bacteriano de la muestra. Con base en este criterio, los científicos informaron de la existencia de más de 4000 tipos de bacterias en su muestra de suelo y de un número igual de formas en una muestra de sedimento marino poco profundo.

Nuestra ignorancia acerca de la amplitud total de la diversidad de la vida agrega una nueva dimensión a la tragedia de la destrucción de las selvas lluviosas tropicales. Aunque estas selvas cubren sólo el 6 por ciento del área terrestre de nuestro planeta, se piensa que albergan dos terceras partes de las especies que existen en el mundo, la mayoría de las cuales no se han estudiado ni identificado. A causa de la destrucción tan rápida que sufren estas selvas, ¡la Tierra está perdiendo muchas especies de las que nunca sabremos siquiera que existieron! Por ejemplo, en 1990 se descubrió una especie de primate, el tití león o tamarín de cara negra, en una pequeña zona de selva lluviosa tropical densa de una isla cercana a la costa oriental de Brasil (**FIGURA 18-7**). Si esta porción de selva hubiera desaparecido antes de descubrir este mono del tamaño de una ardilla, no habría sido posible registrar su existencia. A los ritmos actuales de deforestación, la mayor parte de las selvas tropicales, con su riqueza de vida aún sin describir, habrán desaparecido antes que termine el siglo XXI.

FIGURA 18-7 Tití león o tamarín de cara negra
Los investigadores estiman que no quedan más de 260 individuos en forma silvestre; la cría en cautiverio podría ser la única esperanza de supervivencia para el tamarín de cara negra.

ENLACES CON LA VIDA Un mundo pequeño

A la luz de la intensa curiosidad de los humanos acerca de los orígenes de nuestra especie, no es sorprendente que los sistemáticos hayan dedicado especial atención a la historia evolutiva del *Homo sapiens*, aún no develada por completo. Aunque buena parte de las interrogantes se centran en revelar las conexiones evolutivas entre los humanos modernos y las especies con las que están más estrechamente emparentados, los métodos y las técnicas de la sistemática también se utilizan para evaluar las relaciones evolutivas entre diferentes poblaciones que conforman nuestra especie. Los biólogos han comparado las secuencias de DNA de poblaciones humanas que habitan en distintas partes del mundo; diferentes investigadores han comparado diversas porciones del genoma humano. Como resultado, se cuenta con una gran cantidad de datos y algunos hallazgos interesantes.

En primer lugar, la divergencia genética entre las poblaciones humanas es muy escasa en comparación con la que existe en otras especies animales. Por ejemplo, la gama de diferencias genéticas entre todos los seres humanos de la Tierra es apenas equivalente a una décima parte de las diferencias que existen entre los ratones arbusteros de Norteamérica (y muchas otras especies presentan todavía más variabilidad genética que estos últimos). Como es evidente, todos los humanos somos muy similares genéticamente, y las diferencias entre las diversas poblaciones humanas son mínimas.

También es cada vez más evidente que la mayor parte de la variabilidad genética que existe entre los humanos puede encontrarse en las poblaciones africanas. La gama de las diferencias genéticas encontradas *dentro* de las poblaciones del África subsahariana es más amplia que las que existen entre las poblaciones africanas y cualquier otra población no africana. Para muchos genes, todas las variantes conocidas se encuentran en África y ninguna población no africana contiene variantes distintivas; más bien, las poblaciones no africanas contienen subconjuntos del conjunto africano. Este hallazgo sugiere con gran fuerza que el *Homo sapiens* tuvo su origen en África, y que no hemos vivido en otro lugar el tiempo suficiente para diferenciarnos considerablemente de nuestros ancestros africanos.

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO EL ORIGEN DE UN ASESINO

¿Qué pruebas han logrado persuadir a los biólogos evolucionistas de que el origen del VIH se encuentra en los antropoides y monos? Para comprender el razonamiento evolutivo detrás de esta conclusión, examinemos el árbol evolutivo que se muestra en la **FIGURA 18-8**. Este árbol ilustra la filogenia del VIH y de sus parientes cercanos, que se pone de manifiesto mediante una comparación de secuencias de RNA entre diferentes virus. Observa las posiciones que ocupan en el árbol los cuatro virus de inmunodeficiencia humana (dos cepas de VIH-1 y dos de VIH-2). Una de las cepas de VIH-1 está más estrechamente emparentada con un virus de chimpancé que la otra. De manera análoga, una de las cepas de VIH-2 tiene un parentesco más cercano con el virus de inmunodeficiencia símica (VIS) del macaco cola de cerdo que con la otra cepa de VIH-2. Tanto el VIH-1 como el VIH-2 tienen un parentesco más cercano con virus de antropoides o de monos que el que tienen entre sí.

La única forma como pudo haberse dado la historia evolutiva que se representa en el árbol es que los virus hayan saltado entre especies huésped. Si el VIH hubiera evolucionado estrictamente dentro de huéspedes humanos, los virus causantes del SIDA en los humanos serían los parientes más próximos uno con respecto al otro. Puesto que los virus de los humanos no se agrupan en el árbol filogenético, se infiere que ha habido casos de infección cruzada entre especies, probablemente en numerosas ocasiones. El medio más probable de transmisión es el consumo humano de monos (VIH-2) y chimpancés (VIH-1).

Piensa en esto ¿La comprensión del origen evolutivo del VIH ayudará a los investigadores a idear mejores formas de tratar y controlar la propagación del SIDA? ¿Cómo podría influir ese conocimiento en las estrategias de tratamiento y prevención? Y de manera más general, ¿cómo podría contribuir el pensamiento evolucionista a los avances en la investigación médica?

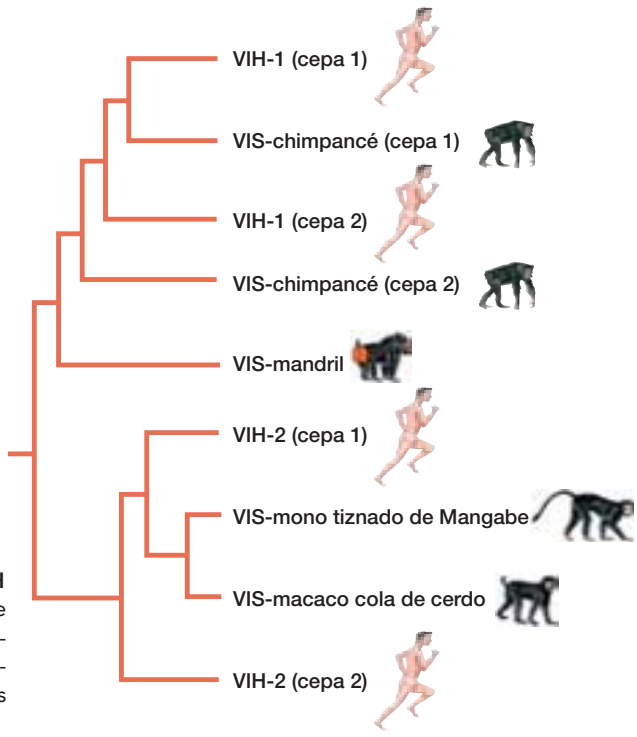


FIGURA 18-8 El análisis evolutivo ayuda a identificar el origen del VIH En esta filogenia de algunos virus de la inmunodeficiencia, los virus que tienen huéspedes humanos no forman un grupo. Esta falta de congruencia entre las historias evolutivas de los virus y sus especies huésped sugiere que seguramente los virus saltaron entre especies huésped. (VIS son las siglas de

REPASO DEL CAPÍTULO

RESUMEN DE CONCEPTOS CLAVE

18.1 ¿Cómo se nombran y clasifican los organismos?

Los organismos se clasifican en categorías jerárquicas que reflejan sus relaciones evolutivas. Las ocho categorías principales, de la más a la menos incluyente, son: dominio, reino, filum, clase, orden, familia, género y especie. El nombre científico de un organismo se forma con el nombre de su género y el nombre de la especie. Las semejanzas anatómicas y moleculares entre organismos son una medida de su parentesco evolutivo.

Web tutorial 18.1 Clasificación taxonómica

18.2 ¿Cuáles son los dominios de la vida?

Los tres dominios de la vida, que representan las tres ramas principales del árbol de la vida, son Bacteria, Archaea y Eukarya. Cada dominio contiene un cierto número de reinos, pero los detalles de la clasificación a nivel de reinos están en un periodo de transición y aún no se esclarecen por completo. Sin embargo, dentro del dominio Eukarya, los reinos Fungi, Plantae y Animalia se aceptan universalmente como grupos monofiléticos válidos.

Web tutorial 18.2 El árbol de la vida

18.3 ¿Por qué cambian las clasificaciones?

Las clasificaciones están sujetas a revisión conforme se descubre más información. En ocasiones resulta difícil definir las fronteras entre especies, particularmente en el caso de las especies de reproducción asexual. Sin embargo, la sistemática es indispensable para una comunicación precisa y contribuye a nuestro conocimiento de la historia evolutiva de la vida.

18.4 ¿Cuántas especies existen?

Aunque sólo se han identificado alrededor de 1.5 millones de especies, las estimaciones del número total de especies existentes alcanzan los 100 millones. Se identifican nuevas especies a razón de 7000 a 10,000 por año, principalmente en las selvas lluviosas tropicales.

TÉRMINOS CLAVE

Archaea *pág. 361*
Bacteria *pág. 361*
biodiversidad *pág. 366*
clase *pág. 358*
dominio *pág. 358*
especie *pág. 358*
Eukarya *pág. 361*
familia *pág. 358*
filogenia *pág. 358*
filum *pág. 358*
género *pág. 358*
nombre científico *pág. 358*
orden *pág. 358*
reino *pág. 358*
secuencia de DNA *pág. 365*
sistemática *pág. 358*

RAZONAMIENTO DE CONCEPTOS

¿Cuáles fueron las aportaciones de Aristóteles, Linneo y Darwin a la taxonomía moderna?

¿Qué características estudiarías para determinar si un delfín está emparentado más estrechamente con un pez que con un oso?

¿Qué técnicas utilizarías para determinar si el extinto oso cavernario tiene un parentesco más cercano con el oso gris que con el oso negro?

4. Se ha descrito científicamente sólo una pequeña fracción del número total de especies que existen en la Tierra. ¿Por qué?

5. En Inglaterra, "papacito piernas largas" es el nombre de una mosca de patas largas, pero en Estados Unidos el mismo nombre se refiere a un animal parecido a una araña. ¿Cómo intentan los científicos evitar este tipo de confusiones?

APLICACIÓN DE CONCEPTOS

1. Son numerosos los campos en los que hay desacuerdo en torno a la clasificación de los organismos. Por ejemplo, no existe un consenso respecto a si el lobo rojo es una especie distinta, ni tampoco acerca de cuántos reinos comprende el dominio Bacteria. ¿Qué importancia tiene que los biólogos consideren al lobo rojo como una especie, o que determinen el reino al que pertenece una especie bacteriana? En palabras de Shakespeare: "¿Qué hay en un nombre?"
2. Las presiones que generan el crecimiento demográfico humano y la expansión económica ponen en peligro los almacenes de biodiversidad biológica, como los trópicos, por ejemplo. La gravedad de la situación se hace patente al considerar que en la actualidad la ciencia conoce probablemente sólo una de cada 20 especies tropicales. ¿Qué argumentos podrías esgrimir para preservar la diversidad biológica en los países pobres y en vías de desarrollo, como los que hay en las zonas tropicales? ¿Esa preservación exige a esos países el sacrificio de su desarrollo económico? Sugiere algunas soluciones al conflicto entre la demanda creciente de recursos y la importancia de conservar la biodiversidad.
3. Durante las inundaciones de gran magnitud, sólo las ramas más altas de los árboles son visibles por encima del agua. Si se te pidiera dibujar las ramas que están bajo la superficie del agua sólo con base en las posiciones de las puntas expuestas, estarías intentando una reconstrucción de algún modo similar a la del "árbol genealógico", mediante el cual los taxónomos vinculan diversos organismos con sus ancestros comunes (puntos de ramificación análogos). ¿Cuáles son las fuentes de error en ambos ejercicios? ¿De qué ventajas gozan los taxónomos modernos?
4. La pantera de Florida, que se encuentra únicamente en la región pantanosa de ese estado (los Everglades), está clasificada actualmente como especie en peligro de extinción con el fin de protegerla de las actividades humanas que podrían provocar su desaparición. Esta pantera ha sido considerada desde hace mucho tiempo como una subespecie del puma (león de la montaña), pero estudios recientes del DNA mitocondrial han demostrado que la pantera de Florida puede ser en realidad un híbrido entre el puma estadounidense y el sudamericano. ¿La Ley sobre Especies en Peligro de Extinción debería proteger a la pantera de Florida?

PARA MAYOR INFORMACIÓN

Dawkins, R. *The Ancestor's Tale*. Boston: Houghton Mifflin, 2004. Una panorámica descrita con gran maestría sobre la historia de la vida como la revela la sistemática.

Gould, S. J. "What Is a Species?" *Discover*, diciembre de 1992. Analiza las dificultades de distinguir especies diferentes.

Mann, C. y Plummer, M. *Noah's Choice: The Future of Endangered Species*. Nueva York: Knopf, 1995. Una mirada provocativa a las difíciles elecciones que tenemos que hacer en relación con la protección de la biodiversidad. ¿Cuáles especies elegiríamos preservar? ¿Qué precio estaríamos dispuestos a pagar?

Margulis, L. y Sagan, D. *What Is Life?* Londres: Weidenfeld & Nicolson, 1995. Un estudio espléndidamente ilustrado de la diversidad de la vida. También incluye una reseña de la historia de la vida y una reflexión en torno a la pregunta que sirve de título al libro.

May, R. M. "How Many Species Inhabit the Earth?" *Scientific American*, octubre de 1992. Aunque nadie sabe la respuesta exacta a esta pregunta, una estimación atinada es crucial para nuestros esfuerzos por administrar nuestros recursos biológicos.

CAPÍTULO 19

La diversidad de los procariotas y los virus

Unos trabajadores se preparan para descontaminar el Hart Office Building, uno de los edificios del Capitolio en Washington, D. C., después de que fue blanco de un ataque con un arma biológica.

DE UN VISTAZO

ESTUDIO DE CASO: Agentes de muerte

19.1 ¿Cuáles son los organismos que constituyen los dominios procarióticos Bacteria y Archaea?

Las bacterias y las arqueas son fundamentalmente diferentes
Los procariotas dentro de cada dominio son difíciles de clasificar
Los procariotas difieren en tamaño y forma

19.2 ¿Cómo sobreviven y se reproducen los procariotas?

Algunos procariotas son móviles
Muchas bacterias forman películas en las superficies
Las endosporas protectoras permiten a algunas bacterias soportar condiciones adversas
Los procariotas se especializan en hábitat específicos
Los procariotas presentan diversos tipos de metabolismo
Los procariotas se reproducen por fisión binaria
Los procariotas pueden intercambiar material genético sin reproducirse

19.3 ¿Cómo afectan los procariotas a los humanos y a otros eucariotas?

Los procariotas desempeñan papeles importantes en la nutrición animal
Los procariotas captan el nitrógeno que necesitan las plantas
Los procariotas son los recicladores de la naturaleza
Los procariotas pueden reducir la contaminación
Algunas bacterias constituyen una amenaza para la salud de los seres humanos

Enlaces con la vida: Comensales indeseables

19.4 ¿Qué son los virus, los viroides y los priones?

Un virus consiste en una molécula de DNA o RNA envuelta en una cubierta proteica
Los virus son parásitos
Algunos agentes infecciosos son aún más simples que los virus

De cerca: ¿Cómo se replican los virus?

Nadie sabe con certeza cómo se originaron estas partículas infecciosas

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO Agentes de muerte

ESTUDIO DE CASO AGENTES DE MUERTE

EN EL OTOÑO DE 2001, un temor que se había albergado durante años se convirtió en una terrible realidad cuando los residentes de Estados Unidos fueron atacados con un arma biológica. El arma, que mató a cinco personas y provocó graves enfermedades en seis más, era simplemente un cultivo de bacterias que se colocaron en sobres y se enviaron al Hart Office Building, un edificio del Senado en Washington, D. C., y a las oficinas de algunos medios de comunicación, donde fueron inhaladas por las víctimas que abrieron los sobres aparentemente inofensivos. El ataque, aunque relativamente pequeño, ilustra dramáticamente la posibilidad y el poder potencial destructivo de un ataque de mayores dimensiones.

La bacteria que se utilizó en el ataque fue el *Bacillus anthracis*, que causa la enfermedad del ántrax y normalmente infecta a los animales domésticos, como cabras y ovejas, pero que también puede infectar a los humanos. La bacteria es un agente infeccioso peligroso y a menudo mortal, con propiedades que la hacen especialmente atractiva para quienes desarrollan armas biológicas. Las bacterias del ántrax se pueden aislar fácilmente de los animales infectados, son baratas y fáciles de cultivar en grandes cantidades y, una vez producidas, pueden secarse y conservarse en forma de polvo que resiste el paso del tiempo. El polvo se convierte fácilmente en arma si se coloca en la cabeza de un misil o en algún otro dispositivo, y una pequeña cantidad de bacterias es capaz de infectar a un número considerable de personas. Las áreas contaminadas con las bacterias de ántrax son muy difíciles de descontaminar.

Desde entonces, se hizo evidente que gran parte de nuestra capacidad para defendernos de los ataques biológicos depende de nuestro conocimiento de los microbios (como se denomina colectivamente a los organismos unicelulares) que causan las enfermedades y que pueden utilizarse como armas biológicas. La investigación científica de los microbios ayudará a obtener el conocimiento necesario para detectar un ataque, destruir microorganismos peligrosos en el ambiente, y prevenir y combatir las infecciones. Por fortuna, los biólogos ya saben bastante acerca de los microorganismos. En este capítulo exploraremos algo de ese conocimiento.

19.1 ¿CUÁLES SON LOS ORGANISMOS QUE CONSTITUYEN LOS DOMINIOS PROCARIÓTICOS BACTERIA Y ARCHAEA?

Los primeros organismos que habitaron la Tierra fueron procariotas, microbios unicelulares que carecían de organelos como núcleo, cloroplastos y mitocondrias. (Véase el capítulo 4 para una comparación entre células procarióticas y eucarióticas). Durante los primeros 1500 millones de años o más de la historia de la vida, todas las formas vivientes eran procarióticas. Incluso en la actualidad, los procariotas son extraordinariamente abundantes. Una gota de sudor contiene cientos de miles de organismos procarióticos, y una cucharada de tierra contiene miles de millones. El cuerpo humano promedio es el hogar de billones de procariotas, que viven en la piel, en la boca, en el estómago y en los intestinos. En términos de abundancia, los procariotas son la forma de vida predominante en la Tierra.

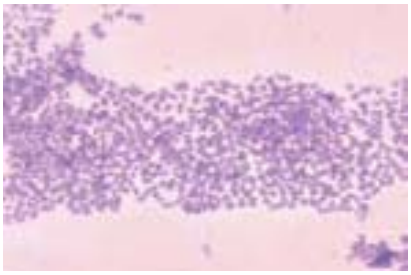
Las bacterias y las arqueas son fundamentalmente diferentes

Dos de los tres dominios de la vida, Bacteria y Archaea, comprenden exclusivamente procariotas. Las bacterias y las arqueas son de apariencia superficialmente similar bajo el microscopio, pero la antiquísima separación evolutiva entre ambos dominios se manifiesta en sorprendentes diferencias entre sus características estructurales y bioquímicas. Por ejemplo, la rígida pared celular que encierra las células bacterianas contiene *peptidoglicano*, que sólo existe en las bacterias, pues las paredes celulares de las arqueas carecen de esta sustancia. Las bacterias y las arqueas también difieren en la estructura y composición de las membranas plasmáticas, los ribosomas y las RNA polimerasas, al igual que en las características fundamentales de procesos básicos como la transcripción y la traducción.

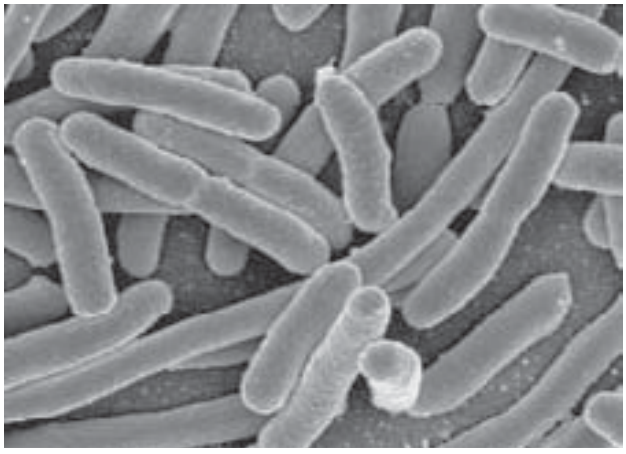
Los procariotas dentro de cada dominio son difíciles de clasificar

A causa de las notables diferencias bioquímicas entre las arqueas y las bacterias, distinguir entre estos dominios es un asunto sencillo, pero la clasificación dentro de cada dominio plantea dificultades especiales. Los procariotas son pequeñísimos y de estructura muy simple y sencillamente no presentan la enorme cantidad de diferencias anatómicas y de desarrollo que permiten inferir la historia evolutiva de plantas, animales y otros eucariotas. En consecuencia, los procariotas se han clasificado sobre la base de características como su forma, medios de locomoción, pigmentos, necesidades nutrimentales, apariencia de sus colonias (es decir, los grupos de individuos que descienden de una sola célula) y propiedades de tinción. Por ejemplo, la técnica de **tinción de Gram** permite distinguir dos tipos de construcción de la pared celular de las bacterias, lo que posibilita su clasificación como bacterias *gram positivas* o *gram negativas*.

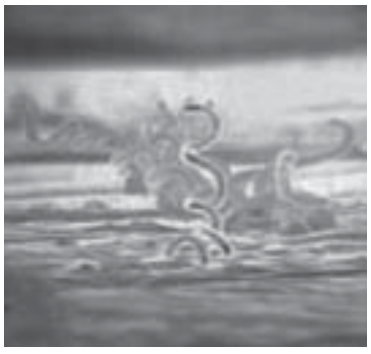
En años recientes se ha expandido considerablemente nuestro conocimiento de la historia evolutiva de los dominios procarióticos gracias a las comparaciones de secuencias de nucleótidos de DNA o RNA. Sobre la base de esta nueva in-



a)



b)



c)

FIGURA 19-1 Tres formas procarióticas comunes
a) Bacterias esféricas del género *Micrococcus*, ***b)*** arqueas con forma de bastón del género *Escherichia*, y ***c)*** bacterias con forma de sacacorchos del género *Borrelia*.

formación, algunos biólogos ahora identifican entre 13 y 15 reinos para clasificar a las bacterias y tres reinos para las arqueas. Sin embargo, la clasificación de los procariotas es un campo que cambia rápidamente y hasta ahora no ha sido posible alcanzar un consenso sobre la clasificación en el nivel de los reinos. Ante el intenso ritmo de generación de datos de secuencias de DNA y el descubrimiento y la descripción con regularidad de tipos nuevos e inconfundibles de bacterias y arqueas, es probable que los esquemas de clasificación de los procariotas aún continúen siendo objeto de revisiones por algún tiempo.

Los procariotas difieren en tamaño y forma

En general, tanto las bacterias como las arqueas son muy pequeñas, con un diámetro de alrededor de 0.2 a 10 micrómetros. (En comparación, el diámetro de las células eucarióticas mide entre 10 y 100 micrómetros). Se podrían reunir alrededor de 250,000 bacterias o arqueas de tamaño medio en el punto con el que concluye este párrafo, aunque algunas especies de bacterias son de mayor tamaño. La bacteria más grande que se conoce es la *Thiomargarita namibiensis*, cuyo diámetro mide 700 micrómetros, lo que hace posible verla a simple vista.

Las paredes celulares que rodean las células procarióticas dan su forma característica a diferentes tipos de bacterias y arqueas. Las formas más comunes son las esféricas, de bastón y de sacacorchos (FIGURA 19-1).

19.2 ¿CÓMO SOBREVIVEN Y SE REPRODUCEN LOS PROCARIOTAS?

La abundancia de procariotas se debe en buena parte a las adaptaciones que permiten a los miembros de los dos dominios procarióticos habitar y aprovechar una amplia gama de ambientes. En este apartado explicaremos algunos de los rasgos que ayudan a los procariotas a sobrevivir y prosperar.

Algunos procariotas son móviles

Muchas bacterias y arqueas se adhieren a una superficie o se encuentran a la deriva en ambientes líquidos, pero algunas pueden moverse. Muchos de estos procariotas móviles poseen **flagelos**. Los flagelos de los procariotas pueden presentarse individualmente en un extremo de la célula, por pares (uno en cada extremo de la célula), como un mechón en un extremo de la célula (FIGURA 19-2a) o dispersos por toda la superficie celular. Los flagelos giran con rapidez e impulsan al organismo a través del medio líquido. Al utilizar sus flagelos para moverse, los procariotas logran dispersarse en nuevos hábitat, desplazarse hacia los nutrimentos y abandonar ambientes desfavorables.

La estructura de los flagelos procarióticos es diferente y mucho más simple que la estructura de los flagelos eucarióticos (véase la página 67 para una descripción del flagelo eucariótico). En las bacterias, una peculiar estructura con apariencia de rueda, incrustada en la membrana bacteriana y en la pared celular, hace posible la rotación del flagelo (FIGURA 19-2b). Los flagelos de las arqueas son más delgados que los de las bacterias y están hechos de proteínas diferentes. Sin embargo, la estructura de los flagelos de las arqueas aún no se conoce tan bien como la de los flagelos de las bacterias.

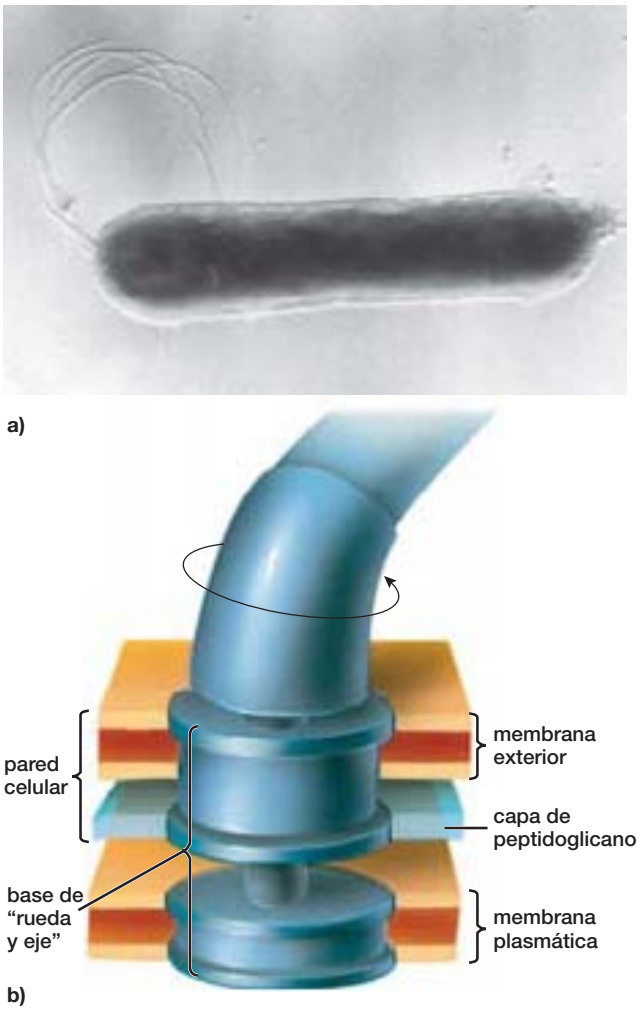


FIGURA 19-2 El flagelo procariótico
a) Una arquea flagelada del género *Aquifex* utiliza sus flagelos para desplazarse hacia ambientes favorables. ***b)*** En las bacterias un singular dispositivo de "rueda y eje" ancla el flagelo dentro de la pared celular y la membrana plasmática, de tal manera que el flagelo puede girar con rapidez.

Muchas bacterias forman películas en las superficies

La pared celular de ciertas especies bacterianas está rodeada de capas pegajosas de material viscoso, compuestas de polisacáridos o proteínas, que protege a las bacterias y las ayuda a adherirse a las superficies. En muchos casos, las bacterias de una o más especies que secretan ese material viscoso se reúnen en colonias para formar comunidades conocidas como *biopelículas*. Una biopelícula muy común es la placa dental, que forman las bacterias que viven en la boca (FIGURA 19-3). La protección que brindan las biopelículas ayuda a defender a las bacterias incrustadas contra una variedad de ataques, incluidos los que lanzan los antibióticos y desinfectantes. Como resultado, las biopelículas que forman las bacterias dañinas para los humanos son muy difíciles de erradicar. La persistencia de las biopelículas es lamentable, porque las superficies en las que se forman incluyen los lentes de contacto, las suturas quirúrgicas y el equipo médico como los catéteres. Además, muchas infecciones del cuerpo humano toman la forma de

FIGURA 19-3 La causa de la caries dental
Las bacterias en la boca del ser humano forman una biopelícula viscosa que les permite adherirse al esmalte de los dientes y las protege de las amenazas del ambiente. En esta micrografía se distinguen las bacterias individuales (en verde y amarillo), incrustadas en la biopelícula café. La biopelícula formada por las bacterias provoca las caries dentales.

biopelículas, incluidas las responsables de la caries dental, las enfermedades de las encías y las infecciones de los oídos.

Las endosporas protectoras permiten a algunas bacterias soportar condiciones adversas

Cuando las condiciones ambientales se tornan inhóspitas, muchas bacterias con forma de bastón forman estructuras protectoras llamadas **endosporas**. Una endospora se forma dentro de la bacteria y contiene material genético y unas cuantas enzimas encerradas dentro de una gruesa capa protectora (**FIGURA 19-4**). La actividad metabólica cesa por completo hasta que la espora encuentra condiciones favorables, entonces el metabolismo se reanuda y la espora se desarrolla como una bacteria activa.

Las endosporas son estructuras resistentes incluso a condiciones ambientales extremas. Algunas resisten la ebullición durante una hora o más. Otras sobreviven durante lapsos extraordinariamente largos. En el ejemplo más extremo de longevidad, unos científicos descubrieron recientemente esporas bacterianas que habían permanecido encerradas en una roca durante 250 millones de años. Luego de extraer con gran cuidado las esporas de su "tumba" pétrea, las incubaron en tubos de ensayo. Increíblemente, se desarrollaron bacterias vivas a partir de esas antiquísimas esporas, más viejas aun que los fósiles de dinosaurio más antiguos.

Las endosporas son una de las razones principales por las que la enfermedad bacteriana conocida como ántrax constituye un agente de terrorismo biológico. La bacteria causante del ántrax forma endosporas, que son el medio por el que los terroristas (o gobiernos) pueden dispersar las bacterias. Las esporas se pueden guardar por tiempo indefinido y son capaces de sobrevivir en las duras condiciones que encontrarían mientras viajan a su destino, incluyendo el lanzamiento en proyectil y el recorrido a gran altitud. Cuando llegan al blanco, las esporas sobreviven a la dispersión en la atmósfera y permanecen viables hasta que una víctima potencial las inhala.

Los procariotas se especializan en hábitat específicos

Los procariotas ocupan prácticamente todos los hábitat, incluso aquellos donde las condiciones extremas impiden que sobrevivan otras formas de vida. Por ejemplo, algunas bacterias prosperan en ambientes donde la temperatura del agua está cercana al punto de ebullición, como en los manantiales calientes del Parque Nacional de Yellowstone (**FIGURA 19-5**). Muchas arqueas viven en medios aún más calientes, incluso en manantiales donde el agua hierve efectivamente o en los respiraderos de las profundidades oceánicas, donde se expele agua sobrecalentada a través de fisuras de la corteza terrestre a temperaturas de hasta 110°C (230ºF). La temperatura también es bastante elevada a 2.8 kilómetros por debajo de la superficie terrestre, donde los científicos descubrieron recientemente una nueva especie bacteriana. También se encuentran bacterias y arqueas en ambientes muy fríos, por ejemplo, en el hielo del océano Antártico.

Incluso las condiciones químicas extremas no consiguen impedir la invasión de procariotas. Prósperas colonias de bacterias y arqueas habitan en el Mar Muerto, donde una concentración de sal siete veces mayor que la de los océanos excluye cualquier otra forma de vida, así como en aguas tan ácidas como el vinagre o tan alcalinas como el amoniaco doméstico. Desde luego, también residen ricas comunidades bacterianas en una gama completa de hábitat menos extremos, incluso dentro del cuerpo humano sano o sobre su superficie. Sin embargo, no es necesario que un animal esté vivo para albergar bacterias. Recientemente se encontró una colonia de bacterias en reposo en el contenido intestinal de un mamut que permaneció en una turbera (un yacimiento de combustible fósil) durante 11,000 años.

Pero ninguna especie individual procariótica es tan versátil como sugieren estos ejemplos. De hecho, casi todos los pro-

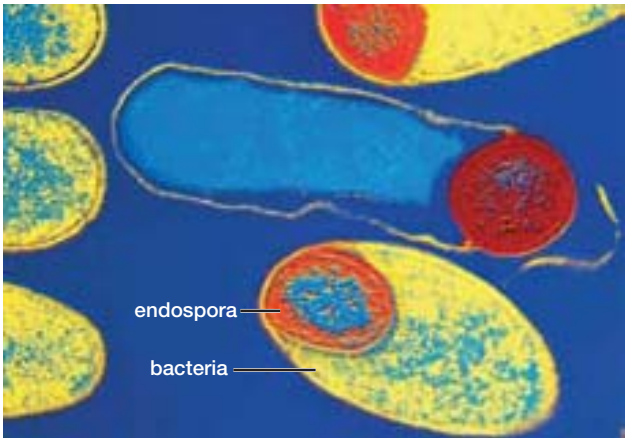


FIGURA 19-4 Las esporas protegen a algunas bacterias
Se han formado endosporas resistentes en el interior de bacterias del género *Clostridium*, causantes de la intoxicación por alimentos potencialmente mortal llamada botulismo. PREGUNTA: ¿Qué explicaría la observación de que la mayoría de las especies bacterianas que forman endosporas viven en el suelo?

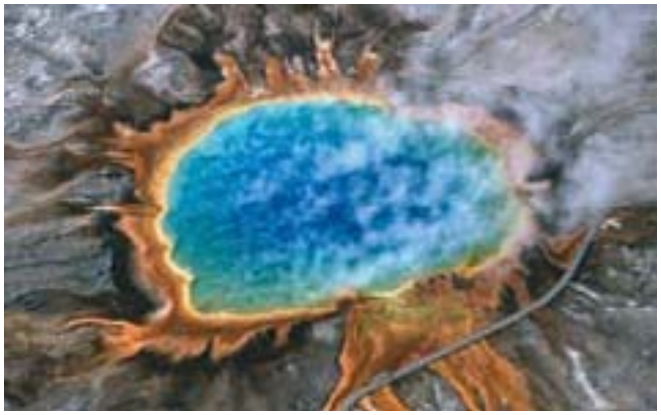


FIGURA 19-5 Algunos procariotas prosperan en condiciones extremas
Los manantiales calientes albergan bacterias y arqueas que toleran el calor y los minerales. Varias especies de cianobacterias confieren vívidas coloraciones a estos manantiales calientes del Parque Nacional de Yellowstone y cada una está confinada a una zona específica determinada por el intervalo de temperaturas. PREGUNTA: Algunas de las enzimas que tienen importantes usos en los procedimientos de biología molecular se extraen de procariotas que viven en manantiales calientes. ¿Sabes por qué?

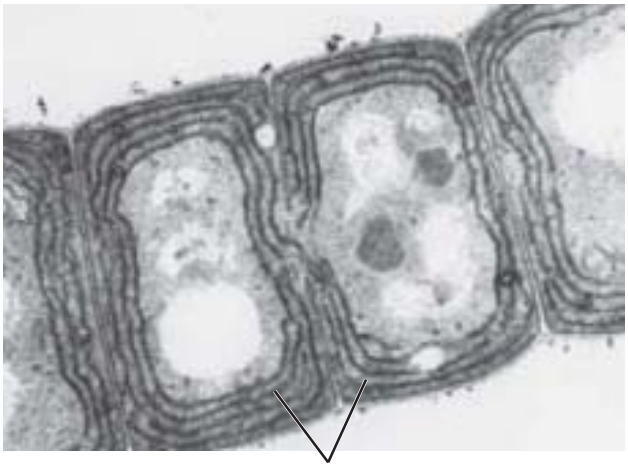


FIGURA 19-6 Cianobacterias
Micrografía electrónica de un corte de un filamento cianobacteriano. La clorofila está sobre las membranas que se observan en el interior de las células.

cariotas son especialistas. Una especie de arquea que habita en los respiraderos de las profundidades oceánicas, por ejemplo, crece de forma óptima a 106°C (223ºF), y deja de crecer por completo a temperaturas por debajo de los 90°C (194ºF). Es evidente que esta especie no podría sobrevivir en un hábitat menos extremo. Las bacterias que viven en el cuerpo humano también están especializadas, de manera que son diferentes entre sí las especies que colonizan la piel, la boca, el tracto respiratorio, el intestino grueso y el tracto urogenital.

Los procariotas presentan diversos tipos de metabolismo

Los procariotas consiguen colonizar hábitat tan diversos, en parte, porque han desarrollado distintos métodos para adquirir energía y nutrimentos del ambiente. Por ejemplo, a diferencia de los eucariotas, muchos procariotas son **anaerobios**, pues no requieren de oxígeno para efectuar su metabolismo. Su capacidad para habitar en ambientes libres de oxígeno permite a los procariotas aprovechar hábitat que son inadecuados para los eucariotas. Para algunos anaerobios —como muchas de las arqueas que se encuentran en los manantiales calientes y la bacteria que causa el tétanos—, el oxígeno es tóxico. Otros son oportunistas que practican la respiración anaeróbica cuando falta oxígeno y cambian a la respiración aeróbica (un proceso más eficiente) cuando disponen de este elemento. Muchos procariotas, desde luego, son estrictamente aeróbicos y requieren de oxígeno todo el tiempo.

Ya sean aeróbicas o anaeróbicas, diferentes especies de procariotas pueden extraer energía de una gama sorprendente de sustancias. Los procariotas subsisten no sólo de carbohidratos, grasas y proteínas que normalmente identificamos como alimentos, sino también de compuestos que no son comestibles o que incluso son tóxicos para los humanos, incluidos el petróleo, el metano (el componente principal del gas natural) y solventes como el benceno y el tolueno. Los procariotas también son capaces de metabolizar moléculas inorgánicas, como hidrógeno, azufre, amoniaco, hierro y nitrito. El proceso de metabolizar moléculas inorgánicas algunas veces da por resultado subproductos que son útiles a otros organismos. Por ejemplo, algunas bacterias liberan en la tierra sulfatos o nitratos, que son nutrimentos fundamentales para las plantas.

Algunas especies de bacterias, como las *cianobacterias* (**FIGURA 19-6**) llevan a cabo fotosíntesis para captar la energía directamente de la luz solar. Al igual que las plantas verdes, las cianobacterias poseen clorofila. La mayoría de las especies producen oxígeno como un subproducto de la fotosíntesis, pero algunas, conocidas como bacterias del azufre, utilizan sulfuro de hidrógeno (H_2S) en vez de agua (H_2O) en la fotosíntesis y liberan azufre en lugar de oxígeno. No se conoce ninguna arquea fotosintética.

Los procariotas se reproducen por fisión binaria

Casi todos los procariotas se reproducen asexualmente por medio de una forma de división celular denominada fisión binaria (véase el capítulo 11), que produce copias genéticamente idénticas de la célula original (**FIGURA 19-7**). En condiciones ideales, una célula procariótica se divide aproximadamente una vez cada 20 minutos, por lo que puede dar origen a miles de trillones (10^{21}) de descendientes en un solo día. Esta rápida reproducción permite a las bacterias explotar hábitat temporales, como un charco de lodo o un budín tibio. La elevada tasa de reproducción también permite a las poblaciones bacterianas desarrollarse rápidamente. Recordemos que muchas mutaciones, que son la fuente de la variabilidad genética, se producen como resultado de errores en la duplicación del DNA durante la división celular (véase el capítulo 10). Por consiguiente, la elevada tasa reproductiva de las bacterias ofrece amplias oportunidades para el surgimiento de nuevas mutaciones, y también permite que los cambios que aumentan las posibilidades de supervivencia se difundan rápidamente.

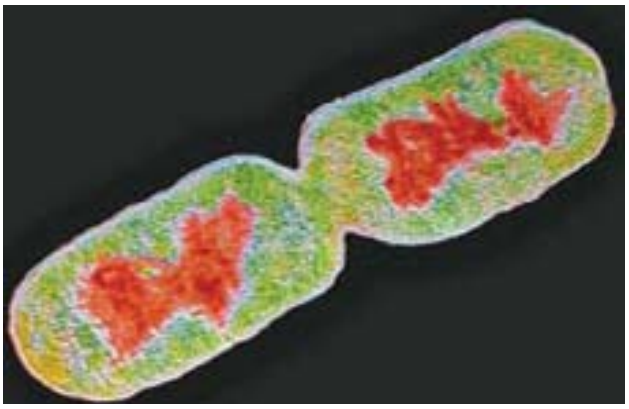


FIGURA 19-7 Reproducción de procariotas
Las células procarióticas se reproducen mediante fisión binaria. En esta micrografía electrónica a color se observa la división de la *Escherichia coli*, un componente normal del intestino humano. Las zonas rojas son material genético. PREGUNTA: ¿Cuál es la ventaja principal de la fisión binaria, en comparación con la reproducción sexual?

Los procariotas pueden intercambiar material genético sin reproducirse

Aunque los procariotas por lo general se reproducen asexualmente, un proceso que deja fuera la posibilidad de recombinación genética, algunas bacterias y arqueas intercambian material genético. En estas especies, el DNA se transfiere de un donador a un receptor durante un proceso que se llama **conjugación**. Las membranas celulares de dos procariotas que se conjugan se funden temporalmente para formar un puente citoplásmico a través del cual se transfiere el DNA. En el caso de las bacterias, las células donadoras utilizan unas extensiones especializadas, llamadas *pelos sexuales*, que se adhieren a la célula receptora para facilitar la conjugación (**FIGURA 19-8**). La conjugación produce nuevas combinaciones genéticas que permiten que las bacterias resultantes sobrevivan en una gran variedad de condiciones. En algunos casos es posible que individuos de diferentes especies intercambien material genético.

El DNA que se transfiere durante la conjugación bacteriana se encuentra dentro de una estructura llamada **plásmido**, que es una molécula pequeña y circular de DNA que está separada del cromosoma bacteriano. Los plásmidos portan genes de resistencia a los antibióticos o incluso alelos de genes que también están presentes en el cromosoma bacteriano principal. Los investigadores en el campo de la genética molecular han utilizado extensamente los plásmidos bacterianos, como se describió en el capítulo 13.

19.3 ¿CÓMO AFECTAN LOS PROCARIOTAS A LOS HUMANOS Y A OTROS EUCARIOTAS?

Aunque son invisibles a nuestros ojos, los procariotas desempeñan un papel crucial en la vida sobre la Tierra. Las plantas y los animales (incluyendo a los seres humanos) dependen por completo de los procariotas, ya que les ayudan a obtener nutrimentos vitales, además de que contribuyen a descomponer y reciclar los desperdicios y los organismos muertos. No podríamos sobrevivir sin los procariotas, pero su efecto en nosotros no siempre es benéfico. Algunas de las enfermedades mortales para los seres humanos provienen de microbios.

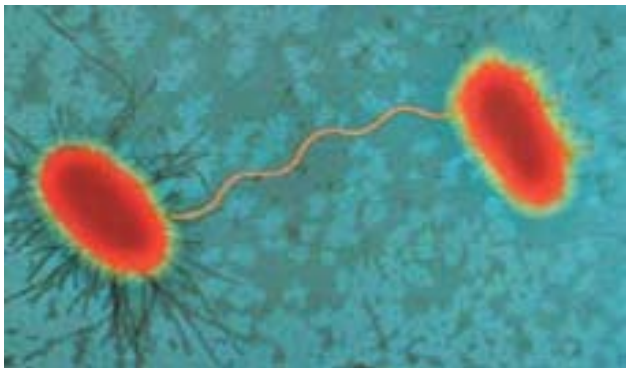


FIGURA 19-8 Conjugación: "apareamiento" procariótico
Durante la conjugación, un procariota actúa como donador al transferir DNA al receptor. En esta fotografía, un par de *Escherichia coli* se conectan mediante un pelo sexual largo, que luego se retraerá atrayendo a la bacteria receptora (a la derecha) hacia la bacteria donadora. Esta última está cubierta de pelos no sexuales, que le ayudan a adherirse a las superficies.

Los procariotas desempeñan papeles importantes en la nutrición animal

Muchos organismos eucarióticos dependen de una estrecha asociación con los procariotas. Por ejemplo, la mayoría de los animales que comen hojas, incluido el ganado, los conejos, los koalas y los ciervos, no son capaces de digerir por sí solos la celulosa, el principal componente de las paredes celulares de las plantas. Por ello, estos animales dependen de ciertas bacterias, que poseen la capacidad inusual de descomponer la celulosa. Algunas de estas bacterias viven en los tractos digestivos de los animales, donde ayudan a liberar los nutrimentos del tejido de las plantas que los animales no pueden descomponer. Sin las bacterias, los animales que se alimentan de hojas no podrían sobrevivir.

Los procariotas tienen asimismo repercusiones importantes en la nutrición humana. Muchos alimentos, como el queso, el yogur y la col agria, se producen mediante la acción de bacterias. También en nuestros intestinos habitan bacterias, que se alimentan de comida sin digerir y sintetizan algunas vitaminas como la K y B_{12}, que luego son absorbidas por el cuerpo humano.

Los procariotas captan el nitrógeno que necesitan las plantas

Los seres humanos no podríamos vivir sin plantas, y las plantas dependen por completo de las bacterias. En particular, las plantas son incapaces de captar el nitrógeno del depósito más abundante de ese elemento: la atmósfera. Las plantas necesitan nitrógeno para crecer y, para obtenerlo, dependen de las **bacterias fijadoras de nitrógeno** o nitrificantes, que viven tanto en el suelo como en nódulos especializados, que son pequeños bultos redondos en las raíces de ciertas plantas (las leguminosas, que incluyen la alfalfa, la soya, el lupino y el trébol; **FIGURA 19-9**). Las bacterias nitrificantes toman nitrógeno gaseoso (N_2) del aire atrapado en el suelo y lo combinan con hidrógeno para producir ion amonio (NH_4^+), un compuesto nitrogenado que las plantas utilizan directamente.

Los procariotas son los recicladores de la naturaleza

Los procariotas también desempeñan un papel fundamental en el reciclamiento de los desperdicios. La mayoría de los pro-

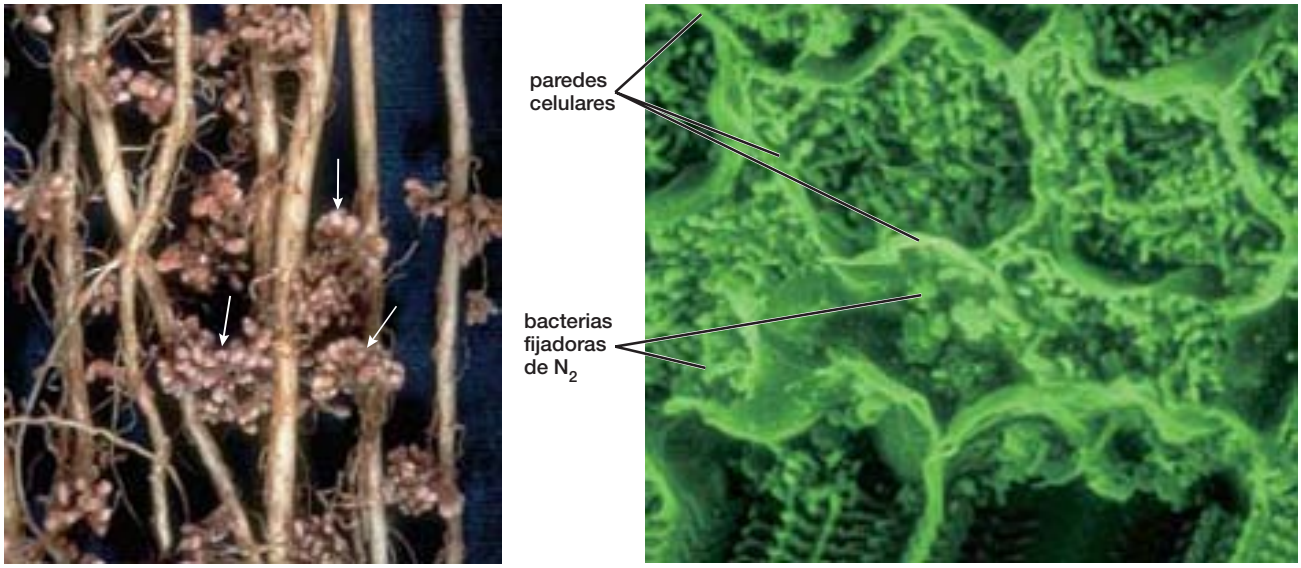


FIGURA 19-9 Bacterias fijadoras de nitrógeno en los nódulos radiculares
a) Unas cámaras especiales, llamadas nódulos, en las raíces de una leguminosa (alfalfa) brindan un ambiente protegido y constante a las bacterias fijadoras de nitrógeno. ***b)*** Esta micrografía electrónica de barrido muestra las bacterias nitrificantes en las células del interior de los nódulos. PREGUNTA: Si todos los procariotas fijadores de nitrógeno de la Tierra murieran súbitamente, ¿qué sucedería con la concentración del gas nitrógeno en la atmósfera?

cariotas obtienen energía descomponiendo complejas moléculas orgánicas (que contienen carbón). Tales procariotas encuentran una vasta fuente de moléculas orgánicas en los productos de desecho y en los cadáveres de plantas y animales. Al consumir y, por consiguiente, descomponer los desperdicios, los procariotas garantizan que éstos no se acumulen en el ambiente. Además, la descomposición que realizan los procariotas libera los nutrimentos que contienen los desechos. Una vez liberados, los nutrimentos pueden ser reutilizados por los organismos vivos.

Los procariotas realizan su servicio de reciclaje dondequiera que se encuentre la materia orgánica. Su labor de descomposición es fundamental en lagos y ríos, en los océanos, así como en el suelo y las aguas subterráneas de los bosques, sabanas, desiertos y otros ambientes terrestres. El reciclaje de los nutrimentos que realizan los procariotas y otros organismos provee la base para la continuación de la vida en la Tierra.

Los procariotas pueden reducir la contaminación

Muchos de los contaminantes que se generan como subproductos de la actividad humana son compuestos orgánicos. Como tales, estos contaminantes sirven potencialmente como alimento para las arqueas y bacterias; de hecho, consumen muchos de ellos. La gama de compuestos que los procariotas atacan es asombrosa. Casi cualquier cosa que los seres humanos sintetizamos es susceptible de descomposición gracias a los procariotas, incluidos los detergentes, muchos pesticidas tóxicos y dañinos químicos industriales, como el benceno y el tolueno.

Los procariotas son capaces de descomponer incluso el petróleo. Poco después de que el buque cisterna *Exxon Valdez* derramara 40 millones de litros de petróleo crudo en 1989 en el Estrecho del Príncipe Guillermo, Alaska, algunos investigadores rociaron las playas impregnadas de petróleo con un fertilizante que favorecía el crecimiento de las poblaciones naturales de bacterias que se alimentan de petróleo. Al cabo de 15 días los depósitos se habían reducido notablemente en comparación con las zonas no rociadas.

La práctica de manipular las condiciones para estimular la descomposición de contaminantes con la ayuda de organismos vivos se conoce como *biorremediación*. Métodos mejorados de biorremediación podrían aumentar drásticamente nuestra capacidad de limpiar sitios contaminados con desperdicios tóxicos, así como los mantos acuíferos contaminados. En la actualidad hay una gran cantidad de investigación que se propone identificar las especies procariotas que son especialmente eficaces en la biorremediación y descubrir métodos prácticos para manipular estos organismos con el fin de mejorar su efectividad.

Algunas bacterias constituyen una amenaza para la salud de los seres humanos

A pesar de los beneficios que brindan ciertas bacterias, los hábitos alimenticios de algunas otras amenazan nuestra salud y bienestar. Estas bacterias **patógenas** (causantes de enfermedades) sintetizan sustancias tóxicas que producen síntomas de enfermedad. (Hasta ahora no se ha identificado ninguna arquea patógena).

Algunas bacterias anaeróbicas producen venenos peligrosos

Ciertas bacterias producen toxinas que atacan al sistema nervioso. Ejemplos de estas bacterias patógenas son *Clostridium tetani*, causante del tétanos, y *Clostridium botulinum*, que produce *botulismo* (una forma de intoxicación a partir de los alimentos que a veces resulta mortal). Ambas especies bacterianas son anaerobias que sobreviven en forma de esporas hasta que se introducen en un ambiente favorable, libre de oxígeno. Por ejemplo, una herida punzante profunda puede ser el medio por el que se introduzcan bacterias de tétanos en un cuerpo humano y lleguen a un lugar donde estén a salvo

ENLACES CON LA VIDA Comensales indeseables

Aunque la posibilidad de un ataque con armas biológicas es aterradora, tienes una probabilidad mucho mayor de encontrar microorganismos dañinos en una fuente más cotidiana: tu comida. Los nutrimentos que consumes durante las comidas y al saborear botanas también representan una fuente de sustento para una gran variedad de bacterias y protistas causantes de enfermedades. Algunos de estos comensales invisibles podrían acompañar tu almuerzo al tracto digestivo e instalarse ahí provocando síntomas desagradables. Los Centros para el Control de Enfermedades estiman que, entre la población estadounidense, anualmente se registran 76 millones de casos de enfermedades provocadas por ingesta de alimentos, lo que da por resultado 325,000 casos de hospitalización y 5200 muertes.

Los responsables más frecuentes de las enfermedades provocadas por alimentos son las bacterias. Las especies de los géneros *Escherichia, Salmonella, Listeria, Streptococcus* y *Campylobacter* son responsables de un gran número de enfermedades; este último género responde por el mayor número de víctimas.

¿Cómo podemos protegernos de las bacterias y protistas que comparten nuestras provisiones de alimento? Muy fácil: hay que limpiar, cocer y enfriar. Limpiar ayuda a prevenir que los microorganismos patógenos se propaguen. Por eso es importante lavarse las manos antes de cocinar y lavar todos los utensilios y tablas de cortar después de preparar cada alimento. Una buena cocción es la mejor manera de exterminar cualquier bacteria o protista en los alimentos. En particular las carnes deben pasar por un buen proceso de cocción; *jamás* hay que comer carne que aún tenga color rosado en el interior (**FIGURA E19-1**). El pescado debe cocinarse hasta que se vea opaco y se pueda cortar fácilmente con un tenedor; hay que cocer los huevos hasta que tanto la clara como la yema estén firmes. Por último, hay que mantener fríos los alimentos. Los microorganismos patógenos se reproducen con la mayor rapidez a temperaturas entre 4 y 60°C (40 y 140°F). Por ello se deben llevar las provisiones de alimento directamente de la tienda a la casa y meterlas en el refrigerador o congelador tan pronto como sea posible. Nunca se debe dejar la comida cocinada sin refrigeración por más de dos horas. Los alimentos congelados deben descongelarse en el refrigerador, no a temperatura ambiente. Un poco de atención a la seguridad en los alimentos puede salvarte de muchos huéspedes indeseables en tu comida.

FIGURA E19-1 La carne de res a media cocción es un refugio para las bacterias peligrosas

del contacto con el oxígeno. Conforme se reproducen, las bacterias liberan su veneno paralizante en el torrente sanguíneo. En el caso de las bacterias del botulismo, un recipiente herméticamente cerrado de comida enlatada que no haya sido esterilizado adecuadamente podría representar un refugio. Al prosperar gracias a los nutrimentos en el interior de la lata, estos anaerobios producen una toxina tan potente que un solo gramo podría matar a 15 millones de personas. Inevitablemente, quizá, este poderoso veneno ha atraído la atención de los creadores de armas biológicas, quienes, según se cree, ya lo han incorporado en sus arsenales.

Los humanos combaten las enfermedades bacterianas antiguas y recientes

Las enfermedades bacterianas han tenido importantes repercusiones en la historia de la humanidad. Quizás el ejemplo más dramático es la peste bubónica, o "peste negra", que mató a 100 millones de personas a mediados del siglo XIV. En muchas partes del mundo falleció una tercera parte de la población o más. La causa de la peste bubónica es la bacteria

, sumamente infecciosa, que es diseminada por pulgas que se alimentan de ratas infectadas y luego se mudan a huéspedes humanos. Aunque la peste bubónica no ha resurgido como epidemia en gran escala, cada año se diagnostican en el mundo de 2000 a 3000 casos de pacientes con esta enfermedad.

Algunas bacterias patógenas parecen surgir de improviso. La enfermedad de Lyme, por ejemplo, era desconocida hasta 1975. La causa de este padecimiento, así llamado por la población de Old Lyme, Connecticut, donde fue descrito por primera vez, es la bacteria en forma de espiral *Borrelia burgdorferi.* El portador de la bacteria es la garrapata del venado, que la transmite a los seres humanos a los que muerde. En un principio, los síntomas se parecen a los de la gripe: escalofríos, fiebre y dolor corporal. Si no recibe tratamiento, semanas o meses después la víctima experimenta salpullido, ataques de artritis y, en algunos casos, anormalidades cardiacas y del sistema nervioso. Tanto los médicos como el público en general están cada vez más familiarizados con esta enfermedad, por lo que ha aumentado el número de pacientes que reciben tratamiento antes de que aparezcan síntomas graves.

Quizá los organismos patógenos más frustrantes son aquellos que vuelven a perseguirnos mucho tiempo después de que creíamos que estaban bajo control. La tuberculosis, una enfermedad bacteriana que alguna vez se erradicó casi por completo en los países desarrollados, va de nuevo en aumento en Estados Unidos y en otros lugares. Dos enfermedades bacterianas de transmisión sexual, la gonorrea y la sífilis, han alcanzado proporciones epidémicas alrededor del mundo. El cólera, una enfermedad que se transmite por medio del agua y que aparece cuando las aguas negras contaminan el agua potable o las zonas de pesca, está bajo control en los países desarrollados, pero sigue siendo un gran asesino en las partes más pobres del mundo.

Algunas especies bacterianas comunes son dañinas

Algunas bacterias patógenas se encuentran extendidas a tal grado y son tan comunes que quizá jamás nos libremos de sus efectos nocivos. Por ejemplo, diferentes formas de la abundante bacteria estreptococo producen diversas enfermedades. Un tipo de estreptococo provoca inflamación de garganta.

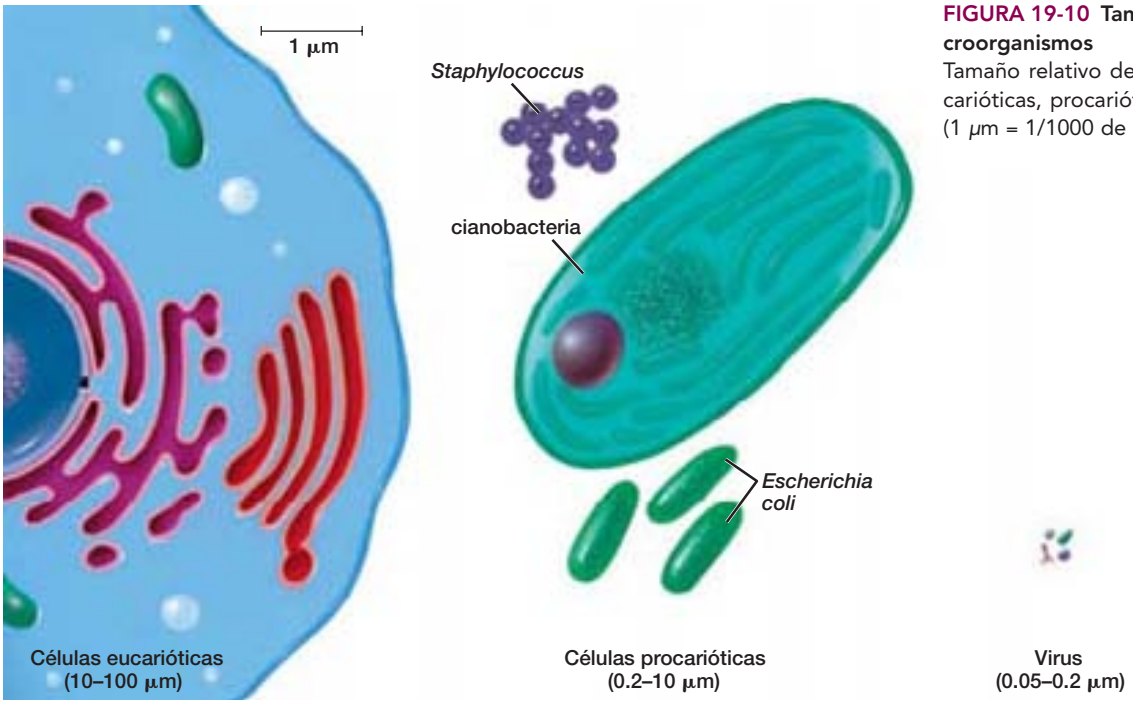


FIGURA 19-10 Tamaño de los microorganismos
Tamaño relativo de las células eucarióticas, procarióticas y los virus (1 μm = 1/1000 de milímetro).

Otro, el *Streptococcus pneumoniae*, causa neumonía al estimular una reacción alérgica que obstruye los pulmones con fluidos. Otra forma de estreptococo se ha vuelto famosa como la "bacteria carnívora". Un pequeño porcentaje de las personas que llegan a infectarse de esta cepa de estreptococo experimenta síntomas graves, que se describen morbosamente en la prensa amarillista con titulares como "Un bicho asesino se comió mi cara". Cada año, unos 800 estadounidenses son víctimas de fascitis necrosante (como se conoce más correctamente la infección que "devora la carne"), y alrededor del 15 por ciento de ellos fallecen. Los estreptococos penetran por lesiones de la piel y expelen toxinas que destruyen la carne directamente o que estimulan un ataque desaforado por parte del sistema inmunitario contra las propias células del cuerpo. Una extremidad puede quedar destruida en cuestión de horas y en algunos casos sólo una amputación consigue detener la rápida destrucción de los tejidos. En otros casos, estas raras infecciones provocadas por estreptococos invaden todo el cuerpo y provocan la muerte en cuestión de días.

Una de las bacterias más comunes que habitan en el aparato digestivo del ser humano es la *Escherichia coli*, que también es capaz de provocar daño. Diferentes poblaciones de *E. Coli* pueden diferir genéticamente y algunas de tales diferencias genéticas transforman esta especie benigna en patógena. Una cepa particularmente notoria, conocida como O157:H7, infecta a unos 70,000 estadounidenses cada año, y unos 60 de ellos mueren a causa de sus efectos. La mayoría de las infecciones provocadas por la bacteria O157:H7 son el resultado de consumir carne de res contaminada. Aproximadamente un tercio del ganado vacuno en Estados Unidos tiene la cepa O157:H7 en su tracto intestinal, y la bacteria puede transmitirse a los seres humanos cuando un matadero inadvertidamente muele parte de los intestinos de un animal para obtener carne para hamburguesas. Una vez en el aparato digestivo del humano, la bacteria O157:H7 se adhiere firmemente a la pared del intestino y comienza a liberar una toxina que causa sangrado intestinal y se propaga a otros órganos a los que también provoca daños. La mejor defensa contra la bacteria O157:H7 es cocer perfectamente toda la carne que se va a consumir. (Para más consejos sobre cómo protegernos de las bacterias en los alimentos, véase la sección "Enlaces con la vida: Comensales indeseables").

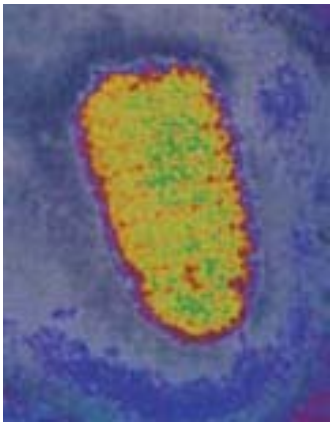
La mayoría de las bacterias son inofensivas

Aunque algunas bacterias atacan al cuerpo humano, la mayoría de aquellas con las que compartimos nuestro cuerpo son inocuas e incluso benéficas. Por ejemplo, la comunidad bacteriana normal de la vagina femenina crea un ambiente hostil a las infecciones por parásitos como las levaduras. Las bacterias que habitan sin causar daño en nuestros intestinos son una fuente importante de vitamina K. Como expresó alguna vez con gran propiedad el médico, investigador y escritor Lewis Thomas: "La naturaleza patógena es, en cierto sentido, una característica que requiere de gran destreza, y sólo una pequeñísima fracción de las innumerables toneladas de microbios del planeta la han desarrollado; la mayoría de las bacterias se ocupan en sus propios asuntos, examinando y reciclando el resto de la vida".

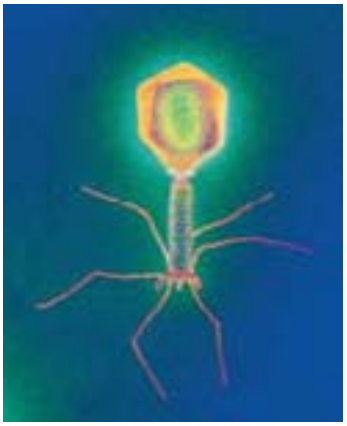
19.4 ¿QUÉ SON LOS VIRUS, LOS VIROIDES Y LOS PRIONES?

Las partículas conocidas como **virus** generalmente se encuentran en estrecha asociación con organismos vivos, pero la mayoría de los biólogos no consideran que tengan vida, pues no presentan las características propias de ésta. Por ejemplo, no son células ni se componen de células. Más aún, son incapaces de cumplir por sí solos tareas básicas que las células vivientes desempeñan comúnmente. Los virus carecen de ribosomas que les permitan fabricar proteínas, tampoco tienen citoplasma ni son capaces de sintetizar moléculas orgánicas ni de extraer y utilizar la energía almacenada en tales moléculas. No poseen membranas propias y no pueden crecer ni reproducirse por sí solos. La simplicidad de los virus parece situarlos fuera del mundo de los seres vivos.

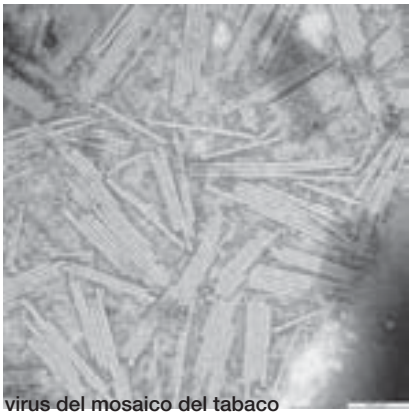
FIGURA 19-11 Los virus tienen diversidad de formas
La forma viral está determinada por la naturaleza de la cubierta proteica de los virus.



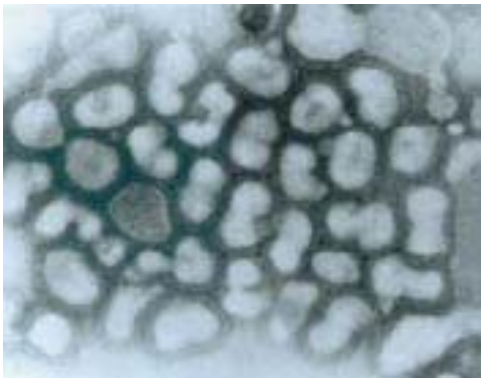
virus de la rabia



bacteriófago



virus del mosaico del tabaco



virus de la influenza

Un virus consiste en una molécula de DNA o RNA envuelta en una cubierta proteica

Los virus son diminutos, mucho más pequeños que las células procarióticas de menor tamaño (**FIGURA 19-10**). Una partícula viral es tan pequeña (de 0.05 a 0.2 micrómetros de diámetro) que para verla es necesaria la enorme potencia de amplificación del microscopio electrónico. Con ese aumento es posible ver que los virus adoptan una gran variedad de formas (**FIGURA 19-11**).

Los virus constan de dos partes principales: una molécula de material hereditario y una cubierta proteica o cápside que envuelve esa molécula. La molécula hereditaria puede ser DNA o RNA, ya sea de una sola cadena o de doble cadena, lineal o circular. La cubierta proteica puede estar rodeada de una envoltura formada a partir de la membrana plasmática de la célula huésped (**FIGURA 19-12**).

Los virus son parásitos

Los virus son parásitos de las células vivas. (Los parásitos viven dentro de los organismos huésped o sobre ellos, y les causan daño). Un virus sólo puede replicarse dentro de una célula **huésped** cito de nuevos virus brota dispuesto a invadir y conquistar las células vecinas (véase la sección "De cerca: ¿Cómo se replican los virus?").

Los virus tienen huéspedes específicos

Cada tipo de virus se especializa en atacar células específicas del huésped. Hasta donde sabemos, ningún organismo es inmune a todos los virus. Incluso las bacterias sucumben víctimas de los invasores virales; los virus que infectan bacterias se llaman **bacteriófagos** (**FIGURA 19-13**

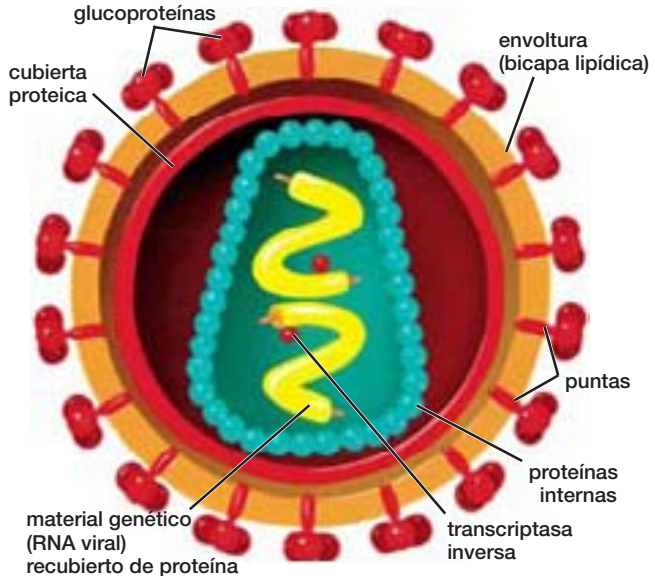


FIGURA 19-12 Estructura viral y replicación
Corte transversal del virus causante del SIDA. Adentro hay material genético rodeado de una cubierta proteica y moléculas de transcriptasa inversa, una enzima que cataliza la transcripción de DNA a partir de la plantilla de RNA viral después que el virus entra en la célula. El virus del SIDA se cuenta entre los que tienen además una envoltura externa que se forma a partir de la membrana plasmática de la célula huésped. Unas puntas de glucoproteína (proteína y carbohidrato) se proyectan desde la envoltura y ayudan al virus a adherirse a su célula huésped. PREGUNTA: ¿Por qué los virus son incapaces de reproducirse fuera de una célula huésped?

úlceras infecciosas. La devastadora enfermedad llamada SIDA (síndrome de inmunodeficiencia adquirida), que inutiliza el sistema inmunitario del organismo, se debe a un virus que ataca un tipo específico de leucocitos que controlan la respuesta inmunitaria del cuerpo. También se ha vinculado a los virus con ciertos tipos de cáncer, como la leucemia de células T (un cáncer de los leucocitos), el de hígado y el cervical.

Las infecciones virales son difíciles de combatir

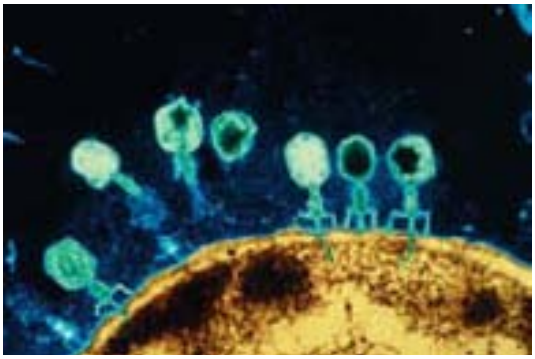


FIGURA 19-13 Algunos virus infectan bacterias
En esta micrografía electrónica se observan bacteriófagos que atacan a una bacteria. Los bacteriófagos inyectan su material genético en el interior y sus cubiertas proteicas permanecen adheridas a la pared celular bacteriana. Las manchas oscuras que se observan dentro de la bacteria son virus recién formados. PREGUNTA: En biotecnología a menudo se utilizan virus para transferir genes entre células de distinta especie. ¿Qué propiedades de los virus los hacen útiles para este propósito?

transmiten a nuevos huéspedes humanos. Finalmente, los virus resistentes predominan, de manera que el medicamento antiviral que antes resultaba eficaz se vuelve inútil.

La dificultad de combatir las infecciones virales hace posible la creación de armas biológicas basadas en virus. De especial importancia en este sentido es el virus de la viruela, una enfermedad que se ha erradicado en condiciones naturales; sólo existen dos laboratorios bien resguardados y de propiedad gubernamental donde se cultiva el virus de la viruela, uno en Rusia y el otro en Estados Unidos. No obstante, es probable que existan muestras de cultivo en otros lugares. Ante esta posibilidad, los planes para destruir las reservas aún existentes del virus se han pospuesto de manera indefinida para que los virus almacenados puedan utilizarse en investigaciones para desarrollar una vacuna más eficaz contra la viruela. Otra amenaza potencial es el virus que causa la fiebre hemorrágica de Ébola, una enfermedad grave que mata a más del 90 por ciento de sus víctimas, la mayoría de las cuales habitan en África. El virus del Ébola es motivo de doble preocupación: por un lado, es una enfermedad infecciosa que apenas comienza a surgir, y por otro, es un arma biológica potencial. Actualmente no existe un tratamiento eficaz para combatir esta enfermedad ni tampoco una vacuna para prevenirla.

Algunos agentes infecciosos son aún más simples que los virus

Los **viroides** son partículas infecciosas que carecen de cubierta proteica y que consisten en cadenas cortas y circulares de RNA. A pesar de su simplicidad, los viroides son capaces de entrar en el núcleo de una célula huésped y dirigir la síntesis de nuevos viroides. Se ha atribuido a los viroides alrededor de una docena de enfermedades de los cultivos, entre ellas la del pepino pálido, las manchas del aguacate y la enfermedad del tubérculo ahusado de la papa.

Los **priones**

DE CERCA ¿Cómo se replican los virus?

Los virus se multiplican, o replican, utilizando su propio material genético, que consiste en RNA o DNA de cadena sencilla o doble, según el virus de que se trate. Este material sirve como plantilla (o plano) para las proteínas virales y el material genético necesarios para crear nuevos virus. Las enzimas virales también pueden participar en la replicación, pero el proceso en conjunto depende de la maquinaria bioquímica que la célula huésped utiliza para elaborar sus propias proteínas.

La replicación viral sigue una secuencia general:

1. *Penetración.* Los virus son fagocitados por la célula huésped (endocitosis). Algunos virus tienen proteínas superficiales que se unen a los receptores de la membrana plasmática de la célula huésped y estimulan la endocitosis. Otros virus están recubiertos por una envoltura capaz de fusionarse con la membrana del huésped. A continuación, el material genético viral se libera dentro del citoplasma.

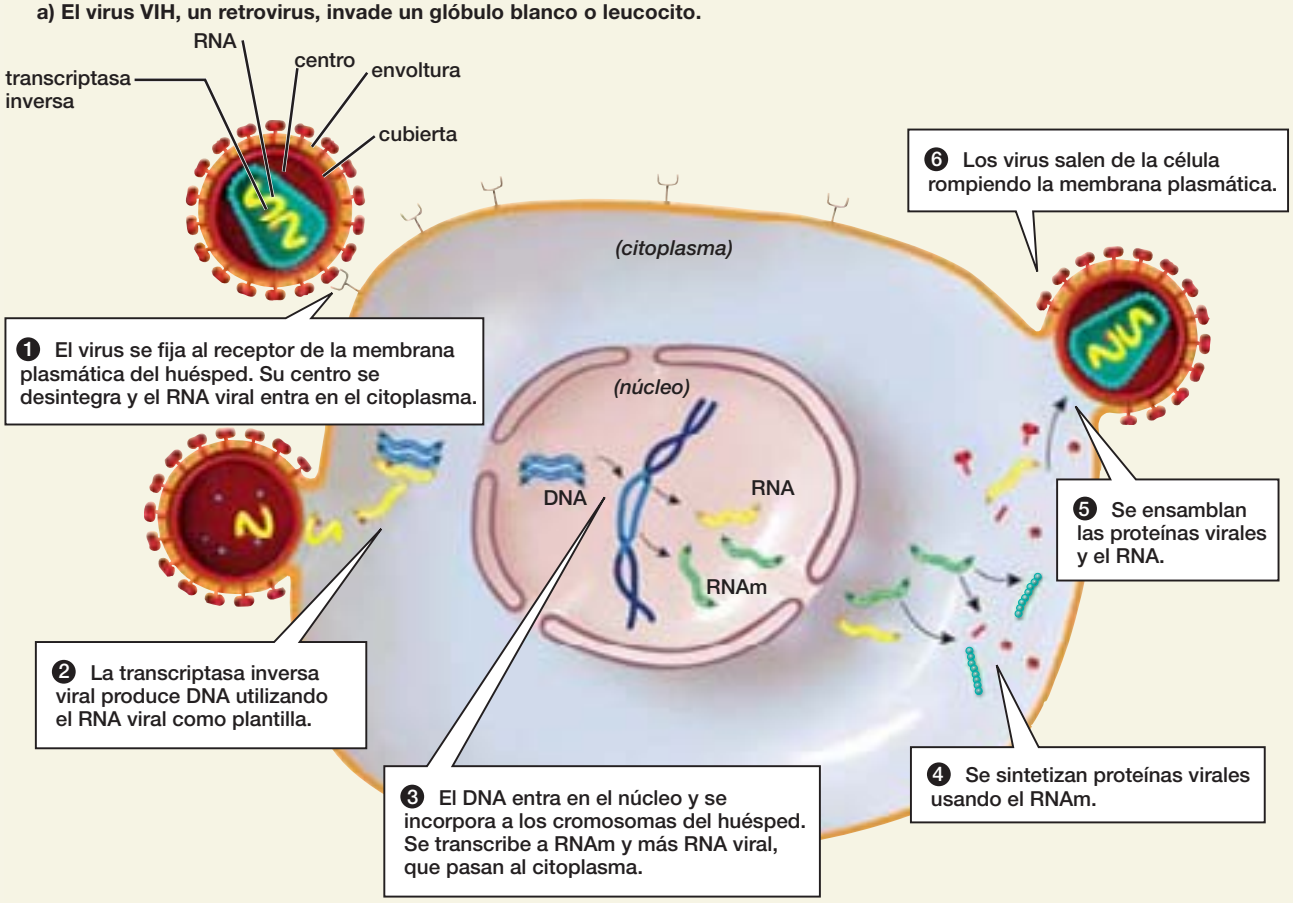

a) El virus VIH, un retrovirus, invade un glóbulo blanco o leucocito.
RNA
transcriptasa inversa
centro
envoltura
cubierta
(citoplasma)
(núcleo)
DNA
RNA
RNAm
1 El virus se fija al receptor de la membrana plasmática del huésped. Su centro se desintegra y el RNA viral entra en el citoplasma.
2 La transcriptasa inversa viral produce DNA utilizando el RNA viral como plantilla.
3 El DNA entra en el núcleo y se incorpora a los cromosomas del huésped. Se transcribe a RNAm y más RNA viral, que pasan al citoplasma.
4 Se sintetizan proteínas virales usando el RNAm.
5 Se ensamblan las proteínas virales y el RNA.
6 Los virus salen de la célula rompiendo la membrana plasmática.

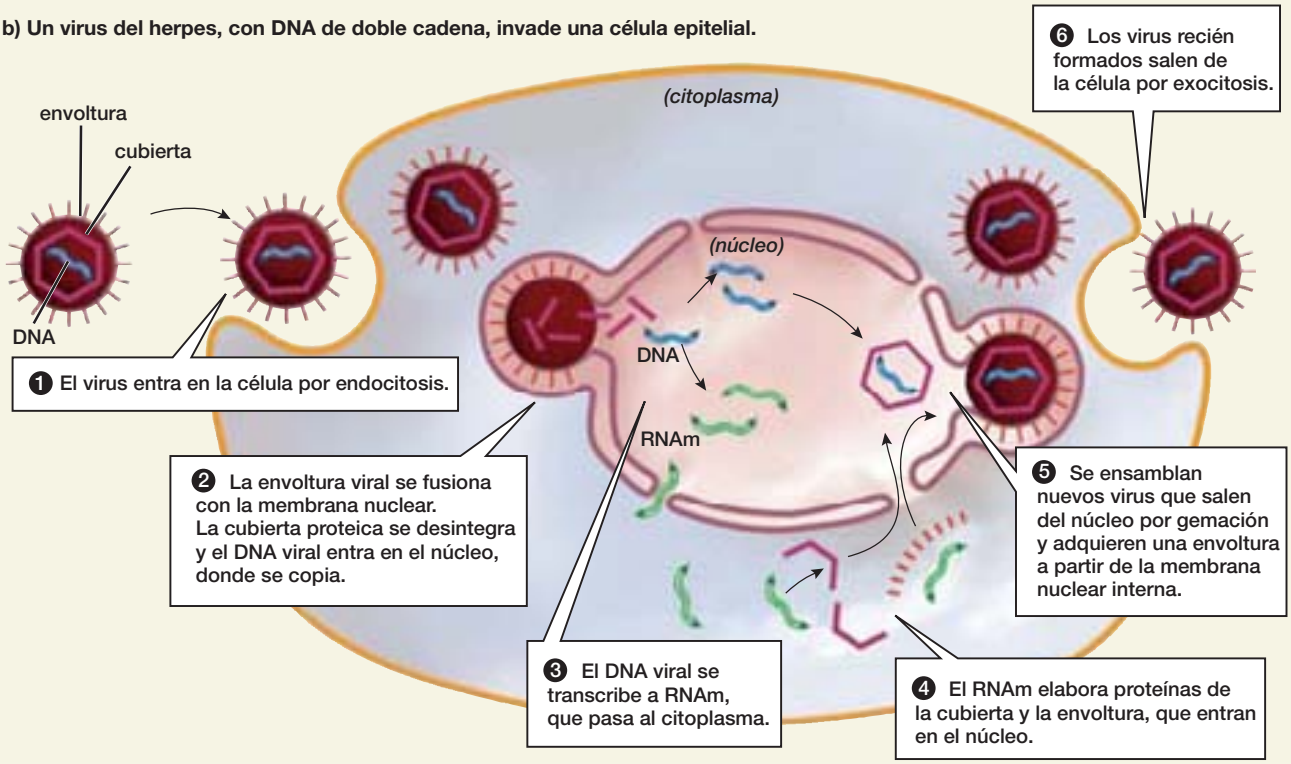
FIGURA E19-2 ¿Cómo se replican los virus?

rativa mortal del sistema nervioso, a la que los fore llamaban *kuru*. Los síntomas del kuru —pérdida de coordinación, demencia y finalmente la muerte— eran similares a los de la extraña, aunque más extendida, *enfermedad de Creutzfeldt-Jakob* en los seres humanos y de la *tembladera (o scrapie)* y la *encefalopatía espongiforme bovina*, enfermedades de los animales domésticos de cría (véase el estudio de caso "Proteínas misteriosas" en el capítulo 3). Todas estas enfermedades provocan que el tejido cerebral se torne esponjoso, es decir, lleno de huecos. Los investigadores de Nueva Guinea averiguaron finalmente que el kuru se transmitía por la vía de un canibalismo ritual; los miembros de la tribu fore honraban a sus muertos consumiendo su cerebro. Esta práctica dejó de llevarse a cabo a partir de entonces y el kuru ha desaparecido casi en su totalidad. Es evidente que la causa del kuru era un agente infeccioso transmitido por tejido cerebral infectado, pero, ¿cuál era ese agente?

En 1982, el neurólogo y ganador del Premio Nobel, Stanley Prusiner, publicó pruebas de que la causa de la tembladera (y, por extensión, el kuru, la enfermedad de Creutzfeldt-Jakob y varios padecimientos similares más) era un agente infeccioso compuesto únicamente de proteína. Esta idea parecía absurda en aquella época, porque casi todos los científicos pensaban que los agentes infecciosos debían contener material genético, como DNA o RNA, para replicarse. Pero Prusiner y sus colaboradores consiguieron aislar el agente infeccioso de hámsteres infectados con tembladera y demostrar que no contenía ácidos nucleicos. Los investigadores dieron el nombre de *priones* a estas partículas infecciosas puramente proteicas (**FIGURA 19-14**).

2. *Replicación.* El material genético viral se copia muchas veces.
3. *Transcripción.* El material genético viral se utiliza como plano para elaborar RNA mensajero (RNAm).
4. *Síntesis de proteínas.* En el citoplasma del huésped, el RNAm viral se utiliza para sintetizar proteínas virales.
5. *Ensamblado viral.* El material genético y las enzimas virales quedan envueltas por su cubierta proteica.
6. *Liberación.* Los virus emergen de la célula por "gemación" desde la membrana celular o por ruptura de la célula.

Aquí se representan dos tipos de ciclo vital de los virus. En la **FIGURA E19-2a** se ilustra el *virus de la inmunodeficiencia humana (VIH)*, causante del SIDA, que es un *retrovirus*. Los retrovirus utilizan RNA de cadena sencilla como plantilla para elaborar DNA de cadena doble mediante una enzima viral denominada *transcriptasa inversa*. Existen muchos otros retrovirus y varios de ellos producen cánceres o tumores. En la **FIGURA E19-2b** se ilustra el *virus del herpes*, que contiene DNA de cadena doble que se transcribe a RNAm.


b) Un virus del herpes, con DNA de doble cadena, invade una célula epitelial.
envoltura
cubierta
DNA
(citoplasma)
(núcleo)
DNA
RNAm
1 El virus entra en la célula por endocitosis.
2 La envoltura viral se fusiona con la membrana nuclear. La cubierta proteica se desintegra y el DNA viral entra en el núcleo, donde se copia.
3 El DNA viral se transcribe a RNAm, que pasa al citoplasma.
4 El RNAm elabora proteínas de la cubierta y la envoltura, que entran en el núcleo.
5 Se ensamblan nuevos virus que salen del núcleo por gemación y adquieren una envoltura a partir de la membrana nuclear interna.
6 Los virus recién formados salen de la célula por exocitosis.

¿Cómo puede una proteína replicarse por sí sola y ser infecciosa? No todos los investigadores están convencidos de que esto sea posible. Sin embargo, las investigaciones recientes han permitido bosquejar un posible mecanismo de replicación para los priones. Resulta que los priones consisten en una única proteína que es producida por las células nerviosas normales. Algunas copias de esta molécula proteica normal, por razones que aún no se comprenden bien, se pliegan de una forma errónea y de este modo se transforman en priones infecciosos. Al parecer, una vez que están presentes, los priones inducen la transformación de otras copias normales de la molécula proteica en priones. Con el tiempo, su concentración en el tejido nervioso podría llegar a ser lo suficientemente grande para provocar daño y degeneración celulares. ¿Por qué una leve alteración de una proteína normalmente benigna tiene el potencial de convertirla en una peligrosa asesina de células? Nadie lo sabe.

Otra peculiaridad de las enfermedades causadas por priones es que pueden heredarse además de transmitirse por infección. Investigaciones recientes han demostrado que ciertas mutaciones leves del gen que contiene el código de la proteína priónica "normal" aumentan la probabilidad de que la proteína se pliegue en forma anormal. Si una de estas mutaciones se transmite genéticamente a los descendientes, también se puede heredar la tendencia a contraer una enfermedad priónica.

Nadie sabe con certeza cómo se originaron estas partículas infecciosas

El origen de los virus, viroides y priones es incierto. Algunos científicos piensan que la enorme variedad de mecanismos de

FIGURA 19-14 Los priones: proteínas enigmáticas
Un corte del cerebro de una vaca infectada con encefalopatía espongiforme bovina contiene agrupamientos fibrosos de proteínas priónicas.

autorreplicación que se da entre estas partículas refleja su condición de vestigios evolutivos de las etapas más antiguas de la historia de la vida, antes que la evolución se estableciera a partir de las moléculas más grandes y de doble cadena de DNA que nos resultan más familiares. Otra posibilidad es que los virus, viroides y priones sean los "descendientes" de células parasitarias que sufrieron degeneración. Estos antiguos parásitos pudieron haber alcanzado tal éxito en la explotación de sus huéspedes, que con el tiempo perdieron la capacidad de sintetizar todas las moléculas necesarias para sobrevivir y terminaron dependiendo de la maquinaria bioquímica del huésped. Cualquiera que haya sido el origen de estas partículas infecciosas, su éxito plantea un desafío permanente a los seres vivos.

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO AGENTES DE MUERTE

Aunque se piensa que la bacteria que provoca el ántrax es el arma biológica por antonomasia, muchos otros agentes infecciosos también tienen el potencial de convertirse en armas. Éstos incluyen los virus que causan la viruela y la fiebre hemorrágica del Ébola, así como las bacterias que causan la peste. También existe evidencia de que algunos países están intentando utilizar la ingeniería genética para "mejorar" los microorganismos patógenos; por ejemplo, quizá estén añadiendo genes de resistencia a los antibióticos a las bacterias responsables de la peste para que se más difícil tratar a las víctimas de un ataque, quienes tendrán mayores probabilidades de morir.

Antes de 2001, la humanidad dependía de la política, la diplomacia y de la repulsión generalizada hacia el concepto de guerra biológica para protegerse de su terrible potencial destructivo. Sin embargo, en la actualidad es dolorosamente claro que la humanidad también depende de la voluntad de los pueblos para utilizar las armas biológicas. Por desgracia, se requiere de escasa experiencia para cultivar bacterias o virus patógenos, y el material y equipo necesarios para ello se adquieren fácilmente. Dada la dificultad para evitar que las armas biológicas caigan en las manos equivocadas, muchas investigaciones actuales se enfocan en desarrollar herramientas para detectar ataques y contrarrestar sus perjuicios.

No es fácil detectar un ataque biológico, puesto que los microorganismos patógenos son invisibles y los síntomas podrían tardar horas o días en aparecer después de consumado el ataque. No obstante, la detección oportuna es crucial si se quiere dar una respuesta eficaz, y en la actualidad se están desarrollando rápidamente una variedad de nuevas tecnologías de detección. Los detectores deben permitir distinguir microorganismos liberados intencionalmente entre una multitud de microbios inocuos que por lo regular viven en el aire, agua y suelo. Un enfoque prometedor depende de sensores que incorporan células vivas humanas inmunes, las cuales se han modificado genéticamente para lanzar destellos cuando las moléculas receptoras en sus membranas celulares se unan con un microorganismo patógeno particular.

Una vez que se detecta un ataque, la tarea fundamental consiste en brindar atención a quienes han sido el blanco. Por consiguiente, desarrollar tratamientos posteriores a la exposición que actúen rápido y se distribuyan fácilmente es una prioridad para los investigadores. Por ejemplo, los biólogos han investigado profundamente el mecanismo por el cual las toxinas que liberan las bacterias del ántrax atacan y dañan las células. Un mejor entendimiento de este proceso ha mejorado la capacidad de los investigadores para bloquearlo y ha generado varias ideas prometedoras para desarrollar antídotos que podrían utilizarse junto con antibióticos como tratamiento para la exposición al ántrax.

Piensa en esto La amenaza de un ataque biológico ha desatado un debate: ¿debería inmunizarse a grandes poblaciones de individuos contra los agentes potenciales de ataque para los cuales existen vacunas? La vacunación masiva es costosa e inevitablemente provocaría algunas muertes a causa de reacciones adversas ocasionales. ¿La mayor protección y la tranquilidad que vendrían junto con la vacunación masiva valdrían ese precio?

REPASO DEL CAPÍTULO

RESUMEN DE CONCEPTOS CLAVE

19.1 ¿Cuáles son los organismos que constituyen los dominios procarióticos Bacteria y Archaea?

Los miembros de los dominios Bacteria y Archaea —las bacterias y las arqueas— son unicelulares y procarióticos. Las bacterias y las arqueas no son parientes cercanos y difieren en varios aspectos fundamentales, como la composición de la pared celular, la secuencia del RNA ribosómico y la estructura lipídica de la membrana. Una pared celular determina las formas características de los procariotas: redonda, de bastón o espiral.

19.2 ¿Cómo sobreviven y se reproducen los procariotas?

Ciertos tipos de bacterias se mueven utilizando sus flagelos; otros forman esporas que se esparcen profusamente y resisten condiciones ambientales desfavorables. Las bacterias y arqueas han colonizado casi todos los hábitat de la Tierra, incluidos ambientes calientes, ácidos, muy salados y anaeróbicos

Los procariotas obtienen energía en una variedad de formas. Algunos, incluidas las cianobacterias, dependen de la fotosíntesis. Otros son quimiosintéticos y descomponen las moléculas inorgánicas para obtener energía. Las formas heterotróficas son capaces de consumir una gran variedad de compuestos orgánicos. Muchos son anaeróbicos y son capaces de obtener energía a partir de la fermentación cuando no hay oxígeno disponible. Los procariotas se reproducen por fisión binaria y pueden intercambiar material genético por conjugación.

Web tutorial 19.1 Conjugación bacteriana

19.3 ¿Cómo afectan los procariotas a los humanos y a otros eucariotas?

Algunas bacterias son patógenas y provocan trastornos como neumonía, tétanos, botulismo y enfermedades de transmisión sexual como la gonorrea y la sífilis. Sin embargo, la mayoría de las bacterias son inofensivas para los humanos y desempeñan papeles importantes en los ecosistemas naturales. Algunas viven en el tracto digestivo de los rumiantes y descomponen la celulosa. Las bacterias que fijan el nitrógeno enriquecen el suelo y ayudan al crecimiento de las plantas. Muchas otras viven de los cadáveres y desperdicios de otros organismos, liberando nutrimentos susceptibles de reutilizarse.

19.4 ¿Qué son los virus, los viroides y los priones?

Los virus son parásitos compuestos de una cubierta proteica que envuelve el material genético. No poseen células y son incapaces de moverse, crecer o reproducirse fuera de una célula viva. Los virus invaden las células de un huésped específico y utilizan la energía, las enzimas y los ribosomas de la célula huésped para producir más partículas virales, que son liberadas cuando la célula se rompe. Muchos virus son patógenos para los seres humanos, entre ellos los causantes del resfriado y la gripe, el herpes, el SIDA y ciertas formas de cáncer.

Los viroides son cadenas cortas de RNA que invaden el núcleo de una célula huésped y dirigen la síntesis de nuevos viroides. Hasta la fecha, se sabe que los viroides originan sólo ciertas enfermedades de las plantas.

Los priones se han relacionado con enfermedades del sistema nervioso, como el kuru, la enfermedad de Creutzfeld-Jakob y la tembladera. Los priones tienen la singular característica de carecer de material genético: se componen exclusivamente de proteína priónica mutante, que actúa como una enzima que cataliza la formación de más priones a partir de proteína priónica normal.

Web tutorial 19.2 Replicación de retrovirus

Web tutorial 19.3 Replicación del virus del herpes

TÉRMINOS CLAVE

anaerobio *pág. 375*
bacterias fijadoras de nitrógeno *pág. 376*
bacteriófago *pág. 380*
conjugación *pág. 376*
endospora *pág. 374*
flagelo *pág. 373*
huésped *pág. 380*
patógeno *pág. 377*
plásmido *pág. 376*
prión *pág. 381*
tinción de Gram *pág. 372*
viroide *pág. 381*
virus *pág. 379*

RAZONAMIENTO DE CONCEPTOS

1. Describe algunas de las formas en que las bacterias obtienen energía y nutrimentos.
2. ¿Qué son las bacterias fijadoras de nitrógeno y qué papel desempeñan en los ecosistemas?
3. ¿Qué es una endospora? ¿Cuál es su función?
4. ¿Qué es la conjugación? ¿Qué papel desempeñan los plásmidos en la conjugación?
5. ¿Por qué los procariotas son especialmente útiles en la biorremediación?
6. Describe la estructura de un virus típico. ¿Cómo se replican los virus?

APLICACIÓN DE CONCEPTOS

1. En ciertos países en desarrollo es posible adquirir antibióticos sin receta médica. ¿Por qué? ¿Qué consecuencias biológicas podría acarrear esta práctica?
2. Antes del descubrimiento de los priones, muchos biólogos (si no es que todos) habrían estado de acuerdo con esta afirmación: "Es un hecho que no puede existir ningún organismo ni partícula infecciosa sin ácido nucleico (como DNA o RNA)". ¿Qué lecciones nos enseñan los priones acerca de la naturaleza, la ciencia y la investigación científica? Tal vez quieras repasar el capítulo 1 para responder esta pregunta.
3. Plantea argumentos a favor y en contra de la afirmación "los virus están vivos".

PARA MAYOR INFORMACIÓN

Costerton, J. y Steart, P. "Battling Biofilms". *Scientific American*, julio de 2001. Se explica cómo se forman las biopelículas y cómo combatirlas.

Madigan, M. y Marrs, B. "Extremophiles". *Scientific American*, abril de 1997. Se habla de los procariotas que prosperan en condiciones extremas y de los usos potenciales de las enzimas que lo permiten.

Prusiner, S. "The Prion Diseases". *Scientific American*, enero de 1995. Una descripción de los priones y de la investigación que condujo a su descubrimiento, desde el punto de vista del científico más influyente en el campo.

Prusiner, S. "Detecting Mad Cow Disease". *Scientific American*, julio de 2004. Un panorama desde la perspectiva de la salud pública sobre la encefalopatía espongiforme bovina y de los nuevos métodos para realizar pruebas de detección de esta enfermedad al ganado.

Villarreal, L. "Are Viruses Alive?" *Scientific American*, diciembre de 2004. Un panorama de lo que sabemos acerca de los virus y sus efectos en la vida.

Young, J. y Collier, R. J. "Attacking Anthrax". *Scientific American*, marzo de 2002. Un resumen de la investigación reciente que podría ayudar a desarrollar nuevas técnicas para detectar y tratar el ántrax.

CAPÍTULO 20

La diversidad de los protistas

El protista fotosintético *Caulerpa taxifolia* es un invasor indeseable en los mares de aguas templadas.

DE UN VISTAZO

ESTUDIO DE CASO: El monstruo verde

20.1 ¿Qué son los protistas?

La mayoría de los protistas son unicelulares
Los protistas presentan diversas formas de nutrición
Los protistas emplean diversas formas de reproducción
Los protistas provocan efectos importantes en los humanos

20.2 ¿Cuáles son los principales grupos de protistas?

Los excavados carecen de mitocondrias
Los euglenozoos tienen mitocondrias características
Los stramenopiles incluyen organismos fotosintéticos y no fotosintéticos
Los alveolados incluyen parásitos, depredadores y fitoplancton
Los cercozoos tienen seudópodos delgados y conchas complejas
Los amebozoos habitan en ambientes acuáticos y terrestres
Las algas rojas habitan principalmente en los océanos tropicales de aguas transparentes
La mayoría de las algas verdes habitan en estanques y lagos

Conexiones evolutivas: Nuestros ancestros unicelulares

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO
El monstruo verde

ESTUDIO DE CASO EL MONSTRUO VERDE

EN CALIFORNIA, ES UN DELITO poseer, transportar o vender *Caulerpa*. ¿Se trata de alguna droga ilegal o de un tipo de arma? No, simplemente es una pequeña alga marina. Entonces, ¿por qué los legisladores querrían prohibirla en su estado?

La historia de *Caulerpa* como enemigo público número uno surge a inicios de la década de 1980 en el zoológico de Wilhelmina en Stuttgart, Alemania. En esa ciudad, los cuidadores de un acuario de agua salada encontraron que el alga tropical *Caulerpa taxifolia* era atractiva, por lo que serviría como adorno de fondo para los peces tropicales del acuario del zoológico. Además, años de cruzamientos en ese zoológico habían producido una generación de algas marinas bien adaptadas a la vida del acuario. La nueva especie era muy resistente y podía sobrevivir en aguas mucho más frías que las aguas tropicales en las cuales la *Caulerpa* habitaba originalmente. Esta nueva generación que vivía en el acuario no sólo era resistente, sino también atractiva, y los administradores del acuario amablemente enviaban ejemplares a otras instituciones que los solicitaban para exhibirlos en sus propios acuarios.

Una institución que recibió algunos ejemplares fue el Museo Oceanográfico de Mónaco, el cual ocupa un edificio estatal que se encuentra casi a orillas del mar Mediterráneo. En 1984, un biólogo marino que visitaba el museo descubrió una pequeña mancha de *Caulerpa* que se estaba extendiendo en las aguas situadas precisamente debajo del museo. Es probable que alguien que limpió el acuario haya arrojado de forma descuidada agua al Mediterráneo contaminándolo con la *Caulerpa*.

Para 1989, la mancha de *Caulerpa* había crecido tanto que cubría varios acres y se había extendido hasta formar una alfombra continua que parecía excluir a todos los demás organismos que habitaban normalmente en el fondo del mar Mediterráneo. Los herbívoros locales, como el erizo de mar y los peces, no se alimentan del alga *Caulerpa*.

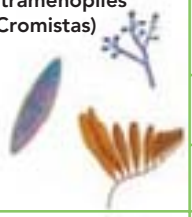
Pronto se hizo evidente que esta alga se expandía rápidamente desplazando a las especies nativas, ya que no hay depredadores que controlen su población. Para mediados de la década de 1990 cundió la alarma entre los biólogos cuando encontraron *Caulerpa* en toda la costa mediterránea desde España hasta Italia. En la actualidad crece en lechos extensos por todo el mar Mediterráneo y cubre vastas áreas del fondo marino.

A pesar de esta amenaza para los ecosistemas, la *Caulerpa* es una criatura fascinante. Volveremos a hablar de esta alga y su biología después de estudiar los protistas, un grupo que incluye a las algas verdes marinas como la *Caulerpa*, junto con un gran número de organismos.

20.1 ¿QUÉ SON LOS PROTISTAS?

Dos de los dominios de los seres vivos, Bacteria y Archaea, contienen solamente procariotas. El tercer dominio, Eukarya, incluye a todos los organismos eucarióticos. Los miembros más sobresalientes del tercer dominio son los reinos Plantae, Fungi y Animalia, de los cuales nos ocuparemos en los capítulos 21 al 24. Los eucariotas restantes constituyen una colección diversa de linajes evolutivos conocidos en conjunto como **protistas** (tabla 20-1). El término "protista" no describe una verdadera unidad evolutiva que comparte características, sino que es un término acomodaticio que significa "cualquier eucariota que no es una planta, un animal o un hongo". Aproximadamente se han descrito 60,000 especies de protistas.

Tabla 20-1 Los principales grupos de protistas

Grupo	Subgrupo	Locomoción	Nutrición	Características representativas	Género representativo
Excavados	Diplomónadas	Nadan con flagelos	Heterótrofa	Sin mitocondria; habitan en el suelo o en el agua o son parásitos	*Giardia* (parásito intestinal de mamíferos)
	Parabasálidos	Nadan con flagelos	Heterótrofa	Sin mitocondria; parásito o comensal	*Tricomonas* (causan tricomoniasis, una enfermedad de transmisión sexual)
Euglenozoos	Euglénidos	Nadan con un flagelo	Autótrofa; fotosintética	Tienen mancha ocular; viven en agua dulce	*Euglena* (habita comúnmente en estanques)
	Kinetoplástidos	Nadan con flagelos	Heterótrofa	Habitan en el suelo o el agua o son parásitos	*Tripanosoma* (causa la enfermedad africana del mal del sueño)
Stramenopiles (Cromistas) 	Mohos acuáticos	Nadan con flagelos (gametos)	Heterótrofa	Filamentosos	*Plasmopara* (causa mildiú velloso)
	Diatomeas	Se deslizan sobre superficies	Autótrofa; fotosintética	Concha de sílice; la mayoría son marinas	*Navicula* (se desliza hacia la luz)
	Algas pardas	Sin motilidad	Autótrofa; fotosintética	Algas marinas de océanos templados	*Macrocystis* (forma bosques de quelpos)
Alveolados	Dinoflagelados	Nadan con dos flagelos	Autótrofa; fotosintética	Muchos son bioluminiscentes; a menudo tienen celulosa	*Gonyaulax* (causa la marea roja)
	Apicomplexa	Sin motilidad	Heterótrofa	Todos son parásitos; forman esporas infecciosas	*Plasmodium* (causa la malaria)
	Ciliados	Nadan con cilios	Heterótrofa	La mayoría son células únicas complejas	*Paramecium* (habita en estanques; de movimiento rápido)
Cercozoos	Foraminíferos	Extienden delgados seudópodos	Heterótrofa	Tienen concha de carbonato de calcio	*Globigerina*
Radiolarios		Extienden delgados seudópodos	Heterótrofa	Tienen conchas de sílice	*Actinomma*
Amebozoos	Amibas lobosas	Extienden gruesos seudópodos	Heterótrofa	Sin concha	*Amoeba* (habita comúnmente en los estanques)
	Mohos deslizantes acelulares	Una masa parecida a una babosa se escurre sobre las superficies	Heterótrofa	Forman un plasmodio multinucleado	*Physarum* (forma una gran masa de color naranja brillante)
	Mohos deslizantes celulares	Las células amiboideas extienden seudópodos; una masa semejante a una babosa se arrastra sobre las superficies	Heterótrofa	Forman un seudoplasmodio con células ameboideas individuales	*Dictyostelium* (a menudo se emplea en estudios de laboratorio)
Algas rojas		Sin motilidad	Autótrofa; fotosintética	Algunas depositan carbonato de calcio; marinas en su mayoría	*Porphyra* (se usa como alimento en Japón)
Algas verdes		Nadan con flagelos (algunas especies)	Autótrofa; fotosintética	Parientes más cercanos de las plantas terrestres	*Ulva* (lechuga de mar)

La mayoría de los protistas son unicelulares

Casi todos los protistas son unicelulares y son invisibles para nosotros en nuestra vida cotidiana. Si de alguna manera pudiéramos volvernos diminutos hasta alcanzar su escala microscópica, nos quedaríamos impresionados por sus hermosas y espectaculares formas, sus diversos estilos de su vida activa, los asombrosos medios en que se reproducen y las innovaciones estructurales y fisiológicas que resultan posibles dentro de los límites de una célula única. Sin embargo, en realidad, por su diminuto tamaño es todo un reto tratar de observarlos. Para apreciar la majestuosidad de los protistas se necesita un microscopio y una buena dosis de paciencia.

Aunque casi todos los protistas son unicelulares, algunos se pueden observar a simple vista y pocos son verdaderamente grandes. Algunos de estos últimos forman colonias de individuos unicelulares, mientras que otros son organismos multicelulares.

Los protistas presentan diversas formas de nutrición

En los protistas se presentan tres formas principales de nutrición. Algunos son capaces de ingerir su alimento, otros absorben nutrimentos del entorno, y otros más captan la energía solar directamente para realizar la fotosíntesis.

Los protistas que ingieren su alimento, por lo general son depredadores. Los protistas unicelulares depredadores tienen membranas celulares flexibles que pueden cambiar de forma para rodear y atrapar bacterias y alimentarse de ellas. Los protistas que se alimentan de esa manera comúnmente utilizan prolongaciones en forma de dedos llamados **seudópodos** (**FIGURA 20-1**) para atrapar a su presa. Otros protistas depredadores emplean cilios para generar pequeñas corrientes que dirigen las partículas de alimento hacia las aberturas en forma de boca que poseen. Cualquiera que sea el medio que utilicen para alimentarse, una vez que el alimento está en el interior de la célula del protista se almacena comúnmente en una *vacuola alimentaria* rodeada por una membrana, para digerirlo después.

Los protistas que absorben los nutrimentos directamente del ambiente pueden vivir en libertad o dentro del cuerpo de otros organismos; aquellos que viven libremente lo hacen en el suelo o en ambientes que contengan materia orgánica muerta, donde realizan una función de descomposición. Sin embargo, muchos de los que se alimentan por absorción viven dentro de otros organismos. En la mayoría de los casos, estos protistas son parásitos cuya actividad para alimentarse causa daños a las especies huéspedes.

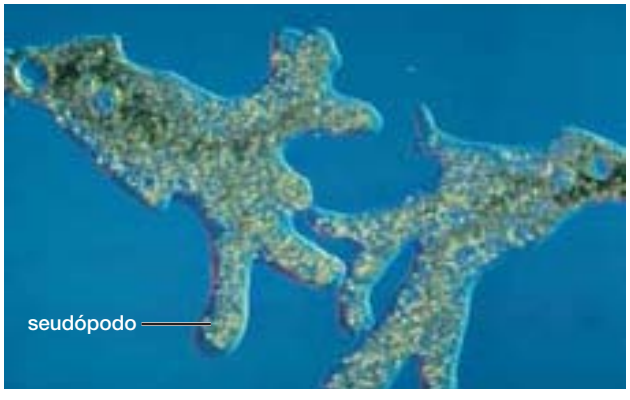


FIGURA 20-1 Seudópodos
Algunos protistas unicelulares pueden extender sus protuberancias para atrapar su alimento o desplazarse.

Los protistas fotosintéticos abundan en los océanos, lagos y estanques. La mayor parte de ellos flotan libres en el agua, pero algunos viven en estrecha asociación con otros organismos, como corales o almejas. Parece que estas asociaciones son benéficas para ambos: el organismo huésped utiliza cierta cantidad de la energía solar captada por los protistas fotosintéticos, al tiempo que brinda refugio y protección a los protistas.

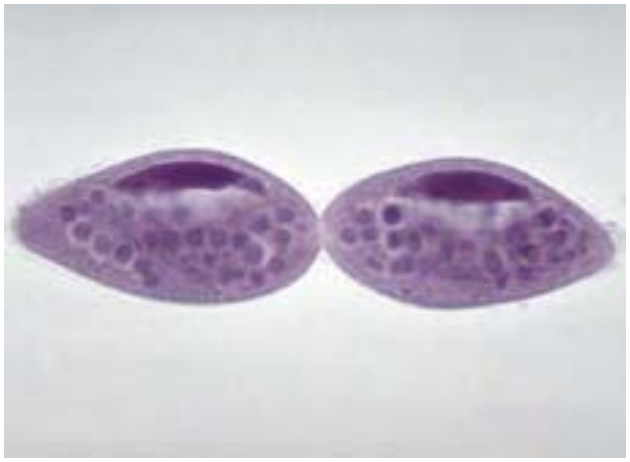
La fotosíntesis de los protistas tiene lugar en los organelos llamados *cloroplastos*. De acuerdo con lo que se explicó en el capítulo 17, los cloroplastos son los descendientes de las bacterias fotosintéticas primitivas que se instalaron dentro de una célula más grande en un proceso conocido como *endosimbiosis*. Además del caso original de endosimbiosis, que dio por resultado el primer cloroplasto, hubo diferentes acontecimientos posteriores de *endosimbiosis secundarias* en las cuales un protista no fotosintético fagocitaba un protista fotosintético que contenía un cloroplasto. Finalmente, desapareció la mayor parte de los componentes de las especies fagocitadas, dejando sólo un cloroplasto rodeado por cuatro membranas: dos del cloroplasto derivado de la bacteria original, una del protista fagocitado y otra de la vacuola alimentaria que originalmente contenía el protista fagocitado. Múltiples acontecimientos de endosimbiosis secundarias son responsables de la presencia de especies fotosintéticas en diversos grupos de protistas no emparentados.

Anteriormente las clasificaciones de protistas agrupaban a las especies de acuerdo con su modo de nutrición, pero ahora que se comprende mejor la historia evolutiva de los protistas, se reconoce que las antiguas categorías no reflejaban con exactitud la filogenia. No obstante, los biólogos todavía emplean la terminología que se refiere a los grupos de protistas que comparten características particulares, pero que no necesariamente están emparentados. Por ejemplo, los protistas fotosintéticos se conocen en conjunto como **algas**, y los protistas unicelulares no fotosintéticos se conocen colectivamente como **protozoarios**.

Los protistas emplean diversas formas de reproducción

En los procariotas, la reproducción es estrictamente asexual; es decir, un individuo se divide para producir dos individuos que son genéticamente idénticos a la célula progenitora. En la mayor parte de los protistas la reproducción es asexual, creando nuevos individuos por división celular mitótica (**FIGURA 20-2a**). Sin embargo, muchos protistas también son capaces de reproducirse sexualmente; en esta modalidad dos individuos aportan material genético a su descendiente que es genéticamente diferente de cualquiera de los progenitores. La presencia de la reproducción sexual en los protistas, pero no en los procariotas, sugiere que el sexo surgió primero en los eucariotas cierto tiempo después de la separación evolutiva entre los dominios de Eukarya y los de Bacteria y Archaea.

Pese a que muchas especies de protistas son capaces de reproducirse sexualmente, la mayor parte de la reproducción es asexual. La reproducción sexual tiene lugar sólo rara vez, en un momento particular del año o en ciertas circunstancias, como en un ambiente abarrotado o cuando el alimento escasea. Los detalles de la reproducción sexual y los ciclos vitales



a)

b)

FIGURA 20-2 Reproducción de los protistas e intercambio de material genético

El ciliado *Paramecium* se reproduce asexualmente por división celular. ***b)*** El ciliado *Euplotes* intercambia material genético a través de un puente citoplásmico. PREGUNTA: ¿Qué quieren decir los biólogos cuando mencionan que el sexo y la reproducción no van juntos en la mayoría de los protistas?

resultantes varían considerablemente entre los diferentes tipos de protistas. Sin embargo, la reproducción de los protistas nunca incluye la formación y el desarrollo de un embrión, como sucede durante la reproducción de plantas y animales. Los procesos no reproductivos que combinan el material genético de individuos diferentes también son comunes entre los protistas (**FIGURA 20-2b**).

Los protistas provocan efectos importantes en los humanos

Aunque la mayoría de nosotros no vemos a los protistas durante nuestra vida cotidiana, estos seres vivos provocan efectos importantes en la vida de los seres humanos, tanto negativos como positivos. El principal efecto positivo en realidad beneficia a todos los organismos vivientes y se deriva del papel ecológico de los protistas marinos fotosintéticos. Al igual que las plantas terrestres, las algas que viven en los océanos captan la energía solar y la ponen a disposición de otros organismos del ecosistema. Así, el ser humano depende de los ecosistemas marinos para su alimentación y, a la vez, estos ecosistemas dependen de las algas. Además, en el proceso de utilizar la fotosíntesis para captar energía, las algas liberan gas oxígeno que ayuda a reabastecer la atmósfera.

En el lado negativo, muchas enfermedades humanas son causadas por los protistas parásitos. Las enfermedades ocasionadas por los protistas incluyen los padecimientos que prevalecen más en la humanidad y algunas de ellas son mortales. Los protistas también causan enfermedades en las plantas, algunas de las cuales atacan a los sembradíos que son importantes para los seres humanos. Además de provocar enfermedades, algunos protistas marinos liberan toxinas que pueden acumularse hasta alcanzar niveles dañinos en las regiones costeras.

Los siguientes apartados incluyen información acerca de los protistas en particular que son los responsables de estos efectos benéficos y perjudiciales.

20.2 ¿CUÁLES SON LOS PRINCIPALES GRUPOS DE PROTISTAS?

Las comparaciones genéticas ayudan a los sistemáticos a comprender mejor la historia evolutiva de los grupos de protistas. Puesto que los sistemáticos se esfuerzan por desarrollar sistemas de clasificación que reflejen la historia evolutiva, la nueva información ha impulsado la revisión de la clasificación de los protistas. Algunas especies de protistas que se habían agrupado con anterioridad con base en el parecido físico, realmente pertenecen a linajes evolutivos independientes que divergieron muy temprano en la historia de los eucariotas. De manera inversa, se vio que algunos grupos de protistas con poco parecido físico entre sí en realidad comparten un ancestro común, y por consiguiente, se clasificaron juntos en los nuevos reinos. Sin embargo, el proceso de revisar la clasificación de los protistas dista mucho de estar completo. Así, nuestra comprensión del árbol familiar eucariótico todavía se encuentra "en construcción"; muchas de las ramas están en su sitio, pero otras están en espera de la nueva información que permita a los sistemáticos colocarlas junto con sus parientes evolutivos más cercanos.

En los siguientes apartados estudiaremos algunos ejemplos de la diversidad de los protistas.

Los excavados carecen de mitocondrias

Los **excavados** recibieron ese nombre porque tienen una ranura de alimentación que les da una apariencia de haber sido "excavados" de la superficie celular. Estos organismos carecen de mitocondrias. Es probable que sus ancestros sí hayan tenido mitocondrias, pero tal vez perdieron tales organelos en forma temprana en la historia evolutiva del grupo. Los dos grupos más grandes de excavados son las diplomónadas y los parabasálidos.

Las diplomónadas poseen dos núcleos

Las células individuales de las **diplomónadas** tienen dos núcleos y se desplazan por medio de múltiples flagelos. Un parásito diplomónada, la *Giardia*, se ha convertido en un verdadero problema en Estados Unidos, en particular para

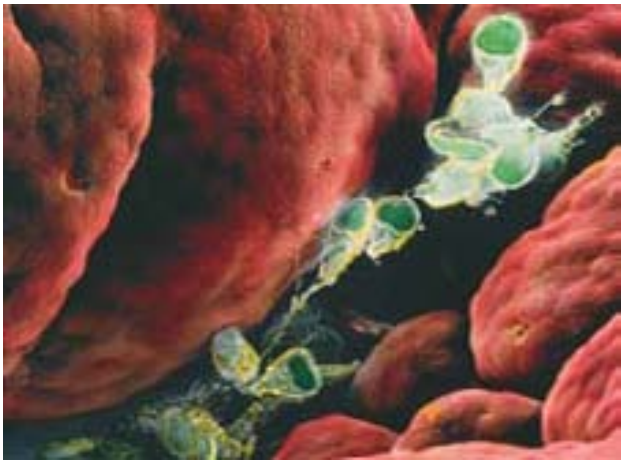


FIGURA 20-3 La *Giardia*: un peligro para los excursionistas
Una diplomónada (género *Giardia*) capaz de infectar al agua potable y de provocar trastornos gastrointestinales se muestra aquí en el intestino delgado de un humano.

FIGURA 20-4 Las tricomonas causan una enfermedad que se transmite sexualmente
El parabasálido *Trichomona vaginalis* infecta los tractos urinario y reproductor del hombre y de la mujer. Sin embargo, la mujer es más propensa a experimentar síntomas desagradables.

los excursionistas que beben agua que baja de las montañas y que aparentemente no está contaminada. Los *quistes* (estructuras resistentes que encierran al organismo durante una fase de su ciclo vital) de estos parásitos se liberan en las heces fecales de los humanos, perros u otros animales infectados; un solo gramo de heces puede contener 300 millones de quistes. Una vez que salen del organismo animal, los quistes entran a las corrientes de agua dulce y a los depósitos de agua comunitarios. Si un mamífero bebe agua contaminada, en su intestino delgado se desarrollan los quistes hasta llegar a su forma adulta (FIGURA 20-3). En los humanos, las infecciones provocan diarrea severa, deshidratación, náusea, vómito y dolores punzantes. Por fortuna, estas infecciones se curan con fármacos, y las defunciones causadas por la *Giardia* no son comunes.

Los parabasálidos incluyen mutualistas y parásitos

Todos los **parabasálidos** conocidos viven dentro de animales. Por ejemplo, este grupo incluye varias especies que habitan en el aparato digestivo de algunas termitas que se alimentan de madera; aunque las termitas son incapaces de digerir la madera, los parabasálidos sí pueden. Así, los insectos y los protistas se benefician mutuamente con esta relación. Las termitas proveen alimento a los parabasálidos en sus intestinos y a medida que los parabasálidos digieren el alimento, cierta cantidad de energía y de nutrimentos liberados quedan disponibles para las termitas.

En otros casos, el animal huésped no se beneficia con la presencia de los parabasálidos, sino que resulta dañado. Por ejemplo, en los seres humanos el parabasálido *Trychomona vaginalis* causa la enfermedad llamada tricomoniasis (FIGURA 20-4), que se transmite sexualmente. Las *tricomonas* habitan en las capas mucosas de los tractos urinario y reproductor y emplean sus flagelos para desplazarse por ellos. Cuando las condiciones son favorables, la población de *tricomonas* se reproduce rápidamente. Las mujeres infectadas experimentan síntomas desagradables, como flujo y comezón vaginal. Los hombres infectados, por lo general, no presentan síntomas, pero pueden transmitir la infección a su pareja sexual.

Los euglenozoos tienen mitocondrias características

En la mayor parte de los **euglenozoos**, los dobleces de la membrana interior de las mitocondrias celulares tienen una forma característica que bajo el microscopio se asemeja a una pila de discos. Dos grupos principales de euglenozoos son los euglénidos y los kinetoplástidos.

Los euglénidos carecen de cubierta rígida y nadan por medio de flagelos

Los **euglénidos** son protistas unicelulares que viven principalmente en agua dulce y su nombre se debe al ejemplar más representativo del grupo, la *Euglena* (FIGURA 20-5), un organismo unicelular complejo que se desplaza por el agua moviendo sus flagelos. Muchos euglénidos son fotosintéticos, pero otras especies absorben el alimento. Los euglénidos

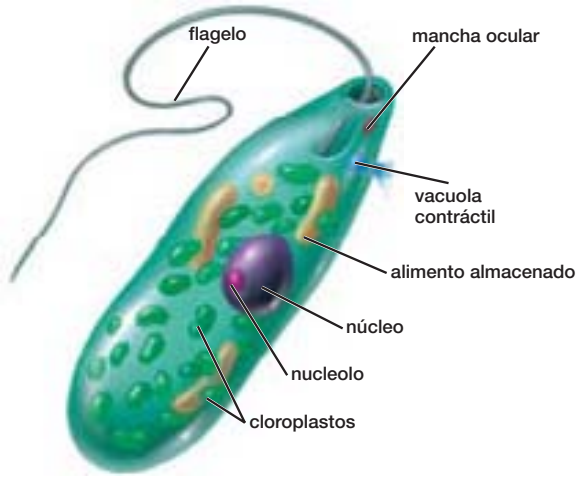


FIGURA 20-5 *Euglena*, un euglénido representativo
La compleja célula única de la *Euglena* está repleta de cloroplastos verdes, los cuales desaparecen si se mantiene al protista en la oscuridad.

FIGURA 20-6 Un kinetoplástido que causa enfermedad
Esta fotomicrografía muestra la sangre humana infestada en alto grado con el kinetoplástido parásito con forma de sacacorchos, el *Trypanosoma,* el cual causa la enfermedad africana del sueño. Observa que el *Trypanosoma* es más grande que los glóbulos rojos.

carecen de una cubierta rígida,así que algunos se desplazan retorciéndose y batiendo sus flagelos. Algunos también poseen organelos sensibles a la luz que consisten en un fotorreceptor, llamado *mancha ocular,* y una mancha adyacente de pigmento. El pigmento brinda sombra al fotorreceptor sólo cuando la luz incide en ciertas direcciones, lo que permite al organismo determinar la dirección de la fuente lumínica. Al usar esta información del fotorreceptor, el flagelo impulsa al protista hacia los niveles adecuados de luz para llevar a cabo la fotosíntesis.

Algunos kinetoplástidos causan enfermedades en los humanos

El DNA de las mitocondrias de los **kinetoplástidos** se encuentra en estructuras características llamadas kinetoplastos. Casi todos los kinetoplástidos poseen, al menos, un flagelo que sirve para impulsar al organismo, detectar el ambiente o atrapar el alimento. Algunos viven en libertad y habitan en el suelo o en el agua; otros viven dentro de otros organismos estableciendo una relación parasitaria, o bien, mutuamente benéfica. Un kinetoplástido parásito peligroso es del género *Trypanosoma* que causa la enfermedad africana del sueño, una enfermedad potencialmente mortal (**FIGURA 20-6**). Al igual que muchos parásitos, este organismo tiene un ciclo vital complejo, parte del cual transcurre dentro de la mosca tsetsé. Al alimentarse con la sangre de un mamífero, la mosca le transmite el tripanosoma. Entonces, el parásito se desarrolla en el nuevo huésped (el cual puede ser un humano) al entrar en el torrente sanguíneo. Después, si otra mosca tsetsé pica al huésped ingerirá al parásito y así se inicia un nuevo ciclo de infección.

Los stramenopiles incluyen organismos fotosintéticos y no fotosintéticos

Los **stramenopiles** (conocidos también como *cromistas* se presentan sólo en ciertas etapas del ciclo vital). Sin embargo, a pesar de su historia evolutiva compartida, los stramenopiles muestran una amplia variedad de formas. Algunos son fotosintéticos y otros no; la mayoría de ellos son unicelulares, pero algunos son multicelulares. Los tres grupos principales de estos organismos son los mohos acuáticos, las diatomeas y las algas pardas.

Los mohos acuáticos han tenido una influencia importante en los seres humanos

Los **mohos acuáticos** u *oomicetos*, forman un pequeño grupo de protistas, muchos de los cuales tienen la forma de filamentos largos que, en conjunto, parecen mechones de algodón. La superficie de estos mechones es parecida a las estructuras producidas por algunos hongos, pero este parecido se debe a la evolución convergente (véase el capítulo 14) y no a que tengan antepasados en común. Muchos mohos acuáticos efectúan una labor de descomposición y viven en el agua y en los suelos húmedos. Algunas especies ejercen un profundo efecto económico en los seres humanos. Por ejemplo, un moho acuático causa la enfermedad de las uvas, conocida como *mildiú velloso* (**FIGURA 20-7**). Su introducción involuntaria en Francia desde Estados Unidos a finales de la década de 1870, casi extinguió la industria vinícola francesa. Otro oomiceto ha destruido millones de árboles de aguacate en California; otro más es el causante del *tizón tardío,* una enfermedad devastadora de la papa. Cuando se introdujo accidentalmente en Irlanda alrededor de 1845, este protista destruyó casi la totalidad de las cosechas de papa, causando una devastadora hambruna durante la cual un millón de irlandeses murieron de hambre y muchos más emigraron a Estados Unidos.

Las diatomeas se encierran dentro de paredes vítreas

Las **diatomeas** son organismos fotosintéticos que se encuentran tanto en aguas dulces como saladas y que elaboran sus conchas protectoras a base de *sílice* (vidrio), algunas de excepcional belleza (**FIGURA 20-8**). Estas conchas constan de dos mitades, una superior y otra inferior que se acoplan como una caja de pastillas o una caja de Petri. La acumulación de paredes vítreas de las diatomeas durante millones de años ha producido depósitos fósiles de "tierra de diatomeas", que llegan a tener cientos de metros de espesor. Esta sustancia suavemente abrasiva se utiliza en la elaboración de diversos productos, como dentífricos y pulidores de metales.

FIGURA 20-7 Un moho acuático parásito
El mildiú velloso, una enfermedad de las plantas causada por el moho acuático *Plasmopara*, casi extinguió la industria vinícola de Francia en la década de 1870. PREGUNTA: Aunque los mohos acuáticos son stramenopiles, se parecen a los hongos y funcionan de forma similar a éstos. ¿A qué se debe esta semejanza?

Las diatomeas forman parte del **fitoplancton**, el conjunto de organismos fotosintéticos unicelulares que flotan pasivamente en las capas superiores de los lagos y océanos de la Tierra. El fitoplancton desempeña un papel ecológico sumamente importante. Por ejemplo, el fitoplancton marino es el responsable casi del 70 por ciento de toda la actividad fotosintética sobre la Tierra; absorbe el dióxido de carbono, recarga la atmósfera con oxígeno y sostiene la compleja red de vida acuática. Las diatomeas, como componentes clave del fitoplancton, son tan importantes para las provisiones del alimento marino que a menudo se les llama la "pastura del mar".

Las algas pardas predominan en las aguas costeras templadas

Aunque la mayor parte de los protistas fotosintéticos —como las diatomeas— son unicelulares, algunos forman conglomerados multicelulares conocidos comúnmente como *algas marinas.* Aunque las algas marinas se parecen a las plantas, no están estrechamente emparentadas con ellas y carecen de las características distintivas del reino vegetal. Por ejemplo, ninguna de las algas marinas presenta raíces o retoños, y ninguna forma embriones durante la reproducción.

Los cromistas incluyen un grupo de algas marinas, las algas pardas o feofitas, que recibieron ese nombre por sus pigmentos de color amarillo-pardo (en combinación con la clorofila verde), los cuales generan tonos que van del café al verde olivo y aumentan la capacidad del alga para captar la luz.

Casi todas las algas pardas son marinas. El grupo incluye las especies dominantes de algas marinas que habitan a lo largo de las costas rocosas de los océanos de agua templada del mundo, incluidas las costas orientales y occidentales de Estados Unidos. Las algas pardas viven en hábitat que van de las regiones cercanas a las costas, donde se afianzan a las rocas que quedan visibles cuando baja la marea, a regiones mar adentro. Varias especies usan vejigas llenas de gas para sostener su cuerpo (**FIGURA 20-9a**). Algunos de los quelpos gigantes que se encuentran a lo largo del litoral del Pacífico alcanzan alturas hasta de 100 metros, y pueden crecer más de 15 centímetros en un solo día. Con su denso crecimiento y gran altura (**FIGURA 20-9b**), los quelpos forman bosques submarinos que brindan alimento, refugio y zonas de apareamiento para los animales marinos.

FIGURA 20-8 Algunas diatomeas representativas
Esta fotomicrografía ilustra la intrincada belleza microscópica y la variedad de las paredes vítreas de las diatomeas.

Los alveolados incluyen parásitos, depredadores y fitoplancton

Los **alveolados** son organismos unicelulares que poseen pequeñas cavidades características debajo de la superficie de sus células. Al igual que los stramenopiles, los alveolados constituyen un linaje que tal vez más adelante adquiera la categoría de reino. Asimismo, a semejanza de los stramenopiles, el vínculo evolutivo entre los alveolados quedó oculto tras la variedad

a)

b)

FIGURA 20-9 Las algas pardas o feofitas son protistas multicelulares
a) El género *Fucus*, que habita cerca de las costas, se muestra aquí expuesto en momentos de marea baja. Observa las vejigas llenas de gas que les permiten flotar en el agua. ***b)*** El quelpo gigante *Macrocystis* forma bosques submarinos cerca de la costa sur de California.

FIGURA 20-10 Dinoflagelados
Dos dinoflagelados cubiertos con su armadura protectora de celulosa. En cada uno se observa un flagelo dentro de un surco que circunda el cuerpo.

FIGURA 20-11 La marea roja
La elevada tasa de reproducción de ciertos dinoflagelados, en las condiciones ambientales idóneas, genera concentraciones tan altas que sus cuerpos microscópicos tiñen de color rojo o café el agua del mar.

de estructuras y modos de vida de los miembros del grupo, pero salió a la luz por medio de las comparaciones moleculares. Algunos alveolados son fotosintéticos, otros son parásitos y algunos más son depredadores. Los grupos de alveolados principales son los dinoflagelados, los aplicomplexa y los ciliados.

Los dinoflagelados nadan por medio de dos flagelos semejantes a látigos

Aunque la mayoría de los **dinoflagelados** son fotosintéticos, hay algunas especies que no lo son. Los dinoflagelados deben su nombre al movimiento que crean sus dos flagelos semejantes a látigos (*dino* significa "remolino" en griego). Un flagelo circunda a la célula y el otro se proyecta detrás de ella. Algunos dinoflagelados están cubiertos sólo por una membrana celular; otros tienen paredes de celulosa que semejan un blindaje (**FIGURA 20-10**). Aunque algunas especies habitan en agua dulce, los dinoflagelados abundan especialmente en el océano, donde son un importante componente del fitoplancton y una fuente de alimento para organismos más grandes. Muchos dinoflagelados son bioluminiscentes, es decir, producen una brillante luz verde-azulada cuando se les molesta. Los dinoflagelados especializados viven dentro de los tejidos de corales, en el interior de algunas almejas y en otros protistas; se encargan de proveer nutrimentos derivados de la fotosíntesis al huésped y de eliminar el dióxido de carbono. Los corales que forman arrecifes habitan solamente en aguas poco profundas y bien iluminadas, en donde pueden sobrevivir los dinoflagelados que se incrustan en ellos.

Cuando el agua es tibia y rica en nutrimentos se genera un crecimiento vertiginoso de las poblaciones de dinoflagelados, los cuales llegan a ser tan numerosos que el agua se tiñe de rojo a causa del color de sus cuerpos, causando la llamada "marea roja" (**FIGURA 20-11**). Durante la marea roja, los peces mueren por miles, asfixiados por la obstrucción de sus branquias o por el agotamiento del oxígeno que resulta de la descomposición de miles de millones de dinoflagelados. Un tipo de dinoflagelado, el *Pfisteria,* te al filtrar millones de protistas del agua y engullirlos. Sin embargo, durante ese proceso sus cuerpos acumulan concentraciones de un veneno que ataca al sistema nervioso y que es producido por los dinoflagelados. Los seres humanos que comen estos moluscos pueden sufrir una intoxicación por envenenamiento, que resulta paralizante y mortal.

Los aplicomplexa son parásitos y carecen de medios de locomoción

Todos los **apicomplexa** (algunas veces conocidos como *esporozoarios*) son parásitos que habitan dentro de los cuerpos de sus huéspedes y algunas veces en el interior de las células de éstos. Forman esporas infecciosas, que son estructuras resistentes transmitidas de un huésped a otro a través del alimento, del agua o por el piquete de un insecto infectado. Al llegar a adultos, los apicomplexa carecen de medios de locomoción. Muchos tienen ciclos vitales complejos, una característica común de los parásitos. Un ejemplo muy conocido es el parásito *Plasmodium*, que transmite la malaria (**FIGURA 20-12**). Parte de su ciclo vital se desarrolla en el estómago y después en las glándulas salivales de la hembra del mosquito *Anopheles.* Cuando este mosquito pica a un ser humano, inyecta el *Plasmodium* a la infortunada víctima. El apicomplexa se desarrolla en el hígado del huésped y luego pasa a la sangre, donde se reproduce rápidamente en los eritrocitos. La liberación de grandes cantidades de esporas, al romperse los glóbulos rojos, causa la fiebre recurrente de la malaria. Los mosquitos no infectados pueden adquirir el parásito al alimentarse con la sangre de quien padece la malaria, y diseminarlo al picar a otras personas.

Aunque el fármaco cloroquina mata al parásito de la malaria, por desgracia, las poblaciones de *Plasmodium* resistentes a este medicamento se diseminan de manera acelerada por toda África, donde prevalece esta enfermedad. Los pro-

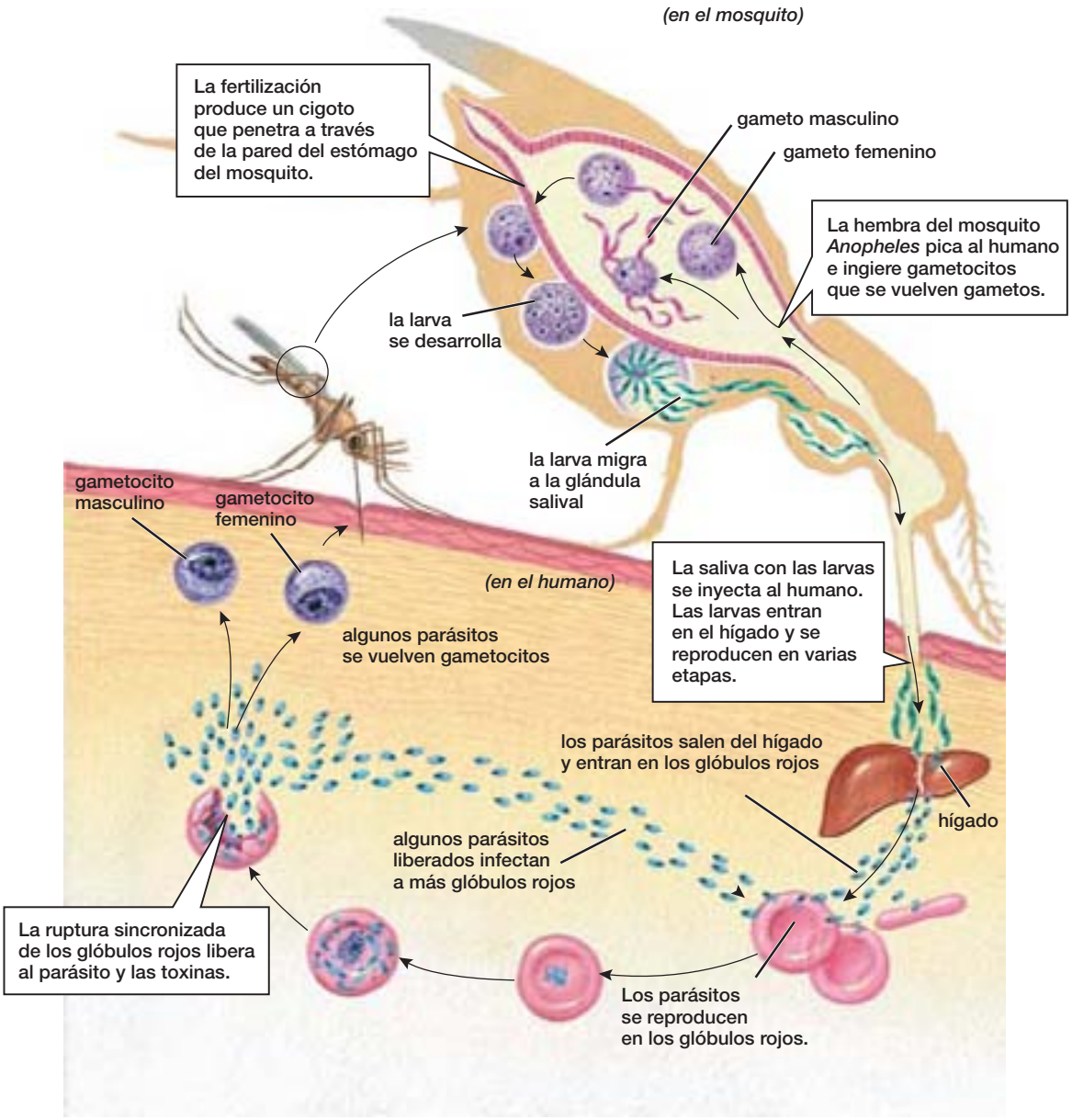

(en el mosquito)
La fertilización produce un cigoto que penetra a través de la pared del estómago del mosquito.
gameto masculino
gameto femenino
La hembra del mosquito *Anopheles* pica al humano e ingiere gametocitos que se vuelven gametos.
la larva se desarrolla
la larva migra a la glándula salival
gametocito masculino
gametocito femenino
(en el humano)
algunos parásitos se vuelven gametocitos
La saliva con las larvas se inyecta al humano. Las larvas entran en el hígado y se reproducen en varias etapas.
los parásitos salen del hígado y entran en los glóbulos rojos
hígado
algunos parásitos liberados infectan a más glóbulos rojos
La ruptura sincronizada de los glóbulos rojos libera al parásito y las toxinas.
Los parásitos se reproducen en los glóbulos rojos.

FIGURA 20-12 El ciclo vital del parásito de la malaria

gramas implantados para erradicar a los mosquitos han fracasado porque éstos se vuelven rápidamente resistentes a los insecticidas.

Los ciliados son los alveolados más complejos

Los **ciliados**, que habitan en aguas dulces y saladas, representan el punto culminante de la complejidad de los organismos unicelulares. Poseen muchos organelos especializados, incluidos los **cilios**, las extensiones cortas parecidas al cabello. Los cilios pueden cubrir la célula o estar en un sitio determinado. En el *Paramecium*, el género tan conocido que vive en agua dulce, hileras de cilios cubren toda la superficie de su cuerpo (FIGURA 20-13

ambiente como si tuviera un sistema nervioso muy desarrollado. Cuando se topa con una barrera nociva, ya sea química o física, la célula inmediatamente se mueve en reversa batiendo sus cilios y luego toma una nueva dirección. Algunos ciliados, como el *Didinium*, son verdaderos depredadores (FIGURA 20-14).

Los cercozoos tienen seudópodos delgados y conchas complejas

Existen protistas de diferentes grupos que poseen membranas plasmáticas flexibles, las cuales pueden extenderse en cualquier dirección para formar seudópodos que les permiten desplazarse y atrapar el alimento. Los seudópodos de los **cercozoos**

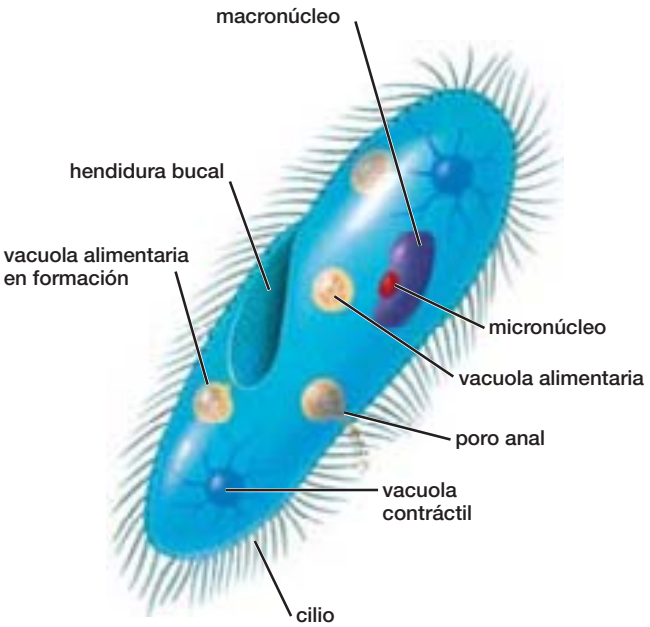


FIGURA 20-13 La complejidad de los ciliados
El ciliado *Paramecium* ilustra algunos de los organelos importantes de los ciliados. La hendidura bucal hace las veces de boca, las vacuolas alimentarias —sistemas digestivos en miniatura— se forman en uno de sus extremos, y los desperdicios se expelen por exocitosis a través del poro anal. Las vacuolas contráctiles regulan la cantidad de agua en el interior.

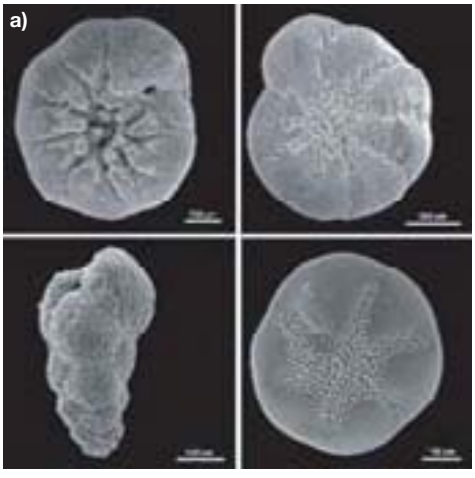
FIGURA 20-14 Un depredador microscópico
En esta micrografía por barrido electrónico, el depredador ciliado *Didinium* ataca a un *Paramecium*. Observa que los cilios del *Didinium* forman dos bandas, mientras que el *Paramecium* tiene cilios en todo su cuerpo. Finalmente, el depredador engullirá y consumirá a su presa. Este drama microscópico bien se podría representar en la punta de un alfiler y todavía sobraría espacio.

Las conchas fósiles de los foraminíferos forman concentraciones calcáreas

Los **foraminíferos** son principalmente protistas marinos que forman hermosas conchas, las cuales están constituidas en su mayor parte por carbonato de calcio (FIGURA 20-15a). Estas conchas están perforadas por cientos de orificios a través de los cuales se extienden los seudópodos. Las conchas calcáreas de los foraminíferos muertos que se hundieron hasta el fondo de los océanos, acumulándose durante millones de años, formaron inmensos depósitos de caliza, como los famosos acantilados blancos de Dover, en Inglaterra.

Los radiolarios tienen conchas vítreas

Los **radiolarios** no son miembros del grupo de los cercozoos, pero forman un linaje separado que se cree estrechamente emparentado con ese grupo. Al igual que los foraminíferos, los radiolarios poseen seudópodos delgados que se prolongan a través de conchas duras. Sin embargo, las conchas de los radiolarios están formadas de sílice vítreo (FIGURA 20-15b). En



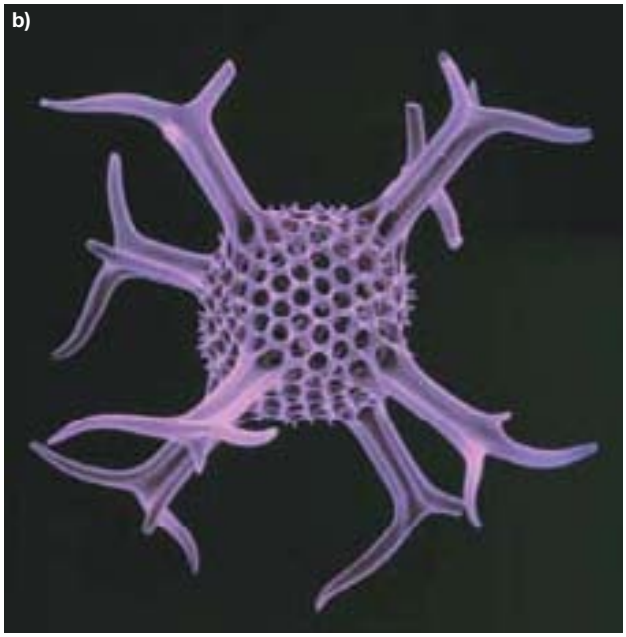


FIGURA 20-15 Foraminíferos y radiolarios
Las conchas calcáreas de los foraminíferos muestran numerosos compartimientos interiores. ***b)*** La delicada concha vítrea de un radiolario. Los seudópodos, que permiten detectar el ambiente y atrapar el alimento, se extienden a través de las aberturas de la concha.

algunas zonas del océano, las conchas de los radiolarios se han acumulado a lo largo del tiempo hasta formar gruesas capas de "cieno de radiolarios".

Los amebozoos habitan en ambientes acuáticos y terrestres

Los **amebozoos** se desplazan extendiendo sus seudópodos en forma de dedos, los cuales también les sirven para alimentarse. Por lo general carecen de conchas. Los grupos principales de los amebozoos son las amibas y los mohos deslizantes.

Las amibas tienen seudópodos gruesos y carecen de concha

Las **amibas**, algunas veces conocidas como *amibas lobosas* para diferenciarlas de otros protistas que tienen seudópodos, habitan comúnmente en los lagos y estanques de agua dulce (FIGURA 20-16). Muchas amibas son depredadoras que acechan a sus presas y las atrapan, pero algunas otras son parásitas. Una amiba parásita causa la disentería, una enfermedad endémica de los climas cálidos. La amiba que causa este padecimiento se multiplica en la pared intestinal, por lo que ocasiona una diarrea severa.

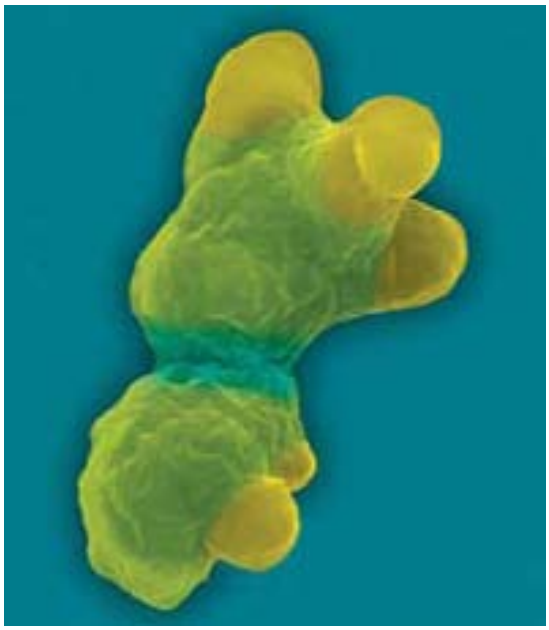


FIGURA 20-16 La amiba
Las *amibas lobosas* son depredadores activos que se desplazan por el agua para atrapar su alimento por medio de seudópodos gruesos y romos.

Los mohos deslizantes que habitan en el suelo de los bosques realizan una labor de descomposición

La forma física de los *mohos deslizantes* parece difuminar la frontera entre una colonia de diferentes individuos y un solo individuo multicelular. El ciclo vital de este moho deslizante consta de dos fases: una etapa móvil de alimentación y una etapa reproductiva estacionaria conocida como *cuerpo esporulado.* Hay dos tipos principales de mohos deslizantes: acelulares y celulares.

Los mohos deslizantes acelulares forman una masa multinucleada de citoplasma llamada plasmodio

Los **mohos deslizantes acelulares**, conocidos también como mohos deslizantes *plasmodiales*, consisten en una masa delgada de citoplasma que puede extenderse sobre varios metros cuadrados. Aunque la masa contiene miles de núcleos diploides, no están confinados en células separadas rodeadas por membranas plasmáticas, como sucede en casi todos los organismos multicelulares. Esta estructura, llamada **plasmodio**, explica por qué tales protistas se llaman "acelulares" (sin células). El plasmodio se desliza por las hojas y troncos en descomposición envolviendo alimento, como bacterias y partículas de materia orgánica. La masa puede tener un color amarillo brillante o naranja. Un plasmodio de gran tamaño resulta bastante asombroso (FIGURA 20-17a). Las condiciones de sequía o inanición estimulan al plasmodio para que forme un cuerpo esporulado dentro del cual se producen esporas haploides (FIGURA 20-17b), las cuales se dispersan y germinan en condiciones favorables para dar origen a un nuevo plasmodio.

a) **b)**

FIGURA 20-17 El hongo deslizante acelular *Physarum*
a) El *Physarum* se desarrolla sobre una piedra en el suelo de un bosque húmedo. ***b)*** Cuando el alimento escasea, la masa se transforma en cuerpos esporulados negros en los que se forman las esporas.

Los mohos deslizantes celulares viven como células independientes, pero se congregan en un seudoplasmodio cuando escasea el alimento

Los **mohos deslizantes celulares** viven en el suelo como células haploides independientes que se mueven y se alimentan extendiendo sus seudópodos. En el género que mejor se ha estudiado, el *Dictyostelium*, las células individuales liberan una señal química cuando escasea el alimento. Esta señal atrae a las células cercanas para formar un conglomerado denso —una masa semejante a una babosa—, llamado **seudoplasmodio** ("plasmodio falso") porque, a diferencia de un plasmodio verdadero, consta en realidad de células individuales (FIGURA 20-18). El seudoplasmodio se comporta como un organismo multicelular. Después de arrastrarse hacia una fuente de luz, las células del conglomerado asumen papeles específicos formando un cuerpo esporulado. Las esporas haploides que se forman dentro de este cuerpo se dispersan gracias al viento y germinan directamente en individuos unicelulares.

Las algas rojas habitan principalmente en los océanos tropicales de aguas transparentes

Las algas rojas o rodófitas son multicelulares y fotosintéticas (FIGURA 20-19). El color de estos protistas va del rojo brillante hasta un tono casi negro, y deben su color a los pigmentos rojos que enmascaran su clorofila verde. Las algas rojas se encuentran casi exclusivamente en los ambientes marinos. Predominan en las aguas tropicales profundas y transparentes, donde sus pigmentos rojos absorben la penetrante luz verde-azulada y transfieren esta energía lumínica a la clorofila, donde se emplea para llevar a cabo la fotosíntesis.

Algunas especies de algas rojas depositan en sus tejidos el carbonato de calcio, el cual forma la piedra caliza, y contribuyen a la formación de arrecifes. En Asia, ciertas especies se recolectan como alimento. Las algas rojas contienen también ciertas sustancias gelatinosas de uso comercial, incluida la carragenina (que se emplea como agente estabilizador de productos como pinturas, cosméticos y helados) y el agar (un

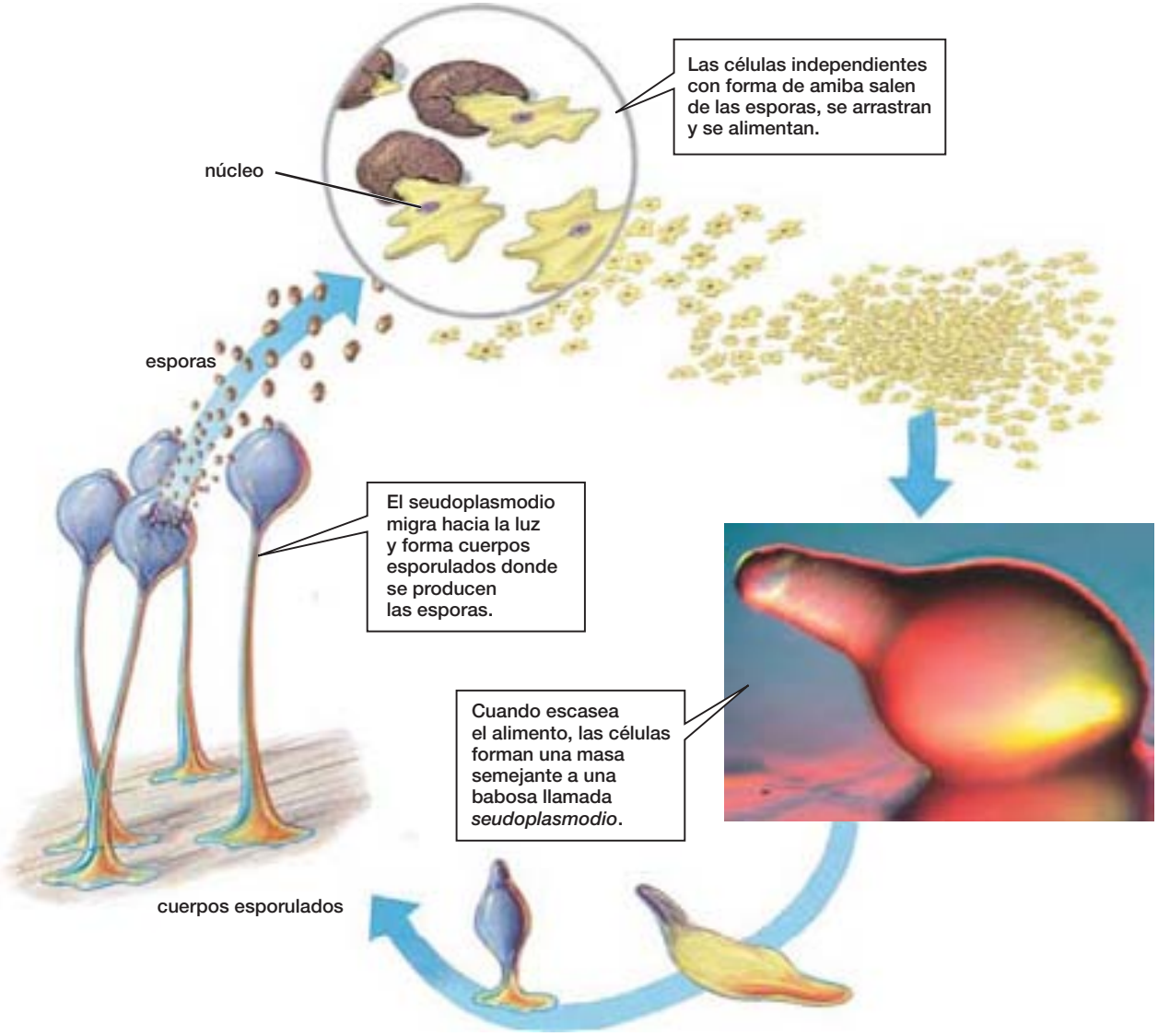

Las células independientes con forma de amiba salen de las esporas, se arrastran y se alimentan.
núcleo
esporas
El seudoplasmodio migra hacia la luz y forma cuerpos esporulados donde se producen las esporas.
Cuando escasea el alimento, las células forman una masa semejante a una babosa llamada *seudoplasmodio*.
cuerpos esporulados

FIGURA 20-19 Algas rojas
Algas coralinas rojas del Océano Pacífico, cerca de las costas de California. Estas algas depositan carbonato de calcio en el interior de su cuerpo y contribuyen a la formación de arrecifes de coral en las aguas tropicales.

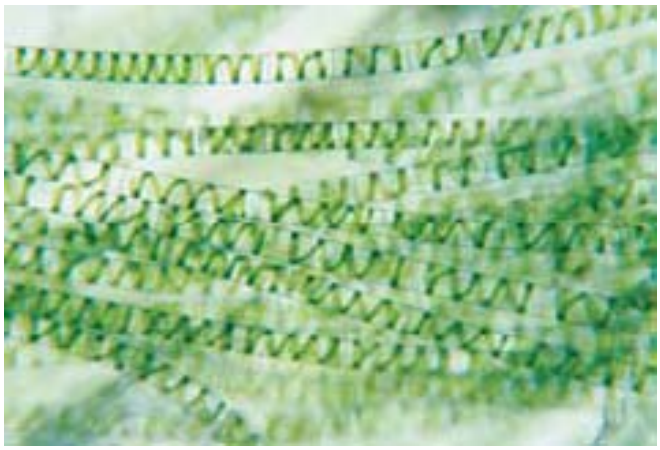
sustrato para cultivar colonias de bacterias en el laboratorio). Sin embargo, la importancia primordial de estas algas y algunas otras reside en su capacidad fotosintética; la energía que captan contribuye a la supervivencia de los organismos que no realizan fotosíntesis y que forman parte de los ecosistemas marinos.

La mayoría de las algas verdes habitan en estanques y lagos

Las algas verdes, un grupo grande y variado de protistas fotosintéticos, incluyen tanto especies multicelulares como unicelulares. La mayor parte de las especies habitan en los estanques y lagos de agua dulce, pero algunas viven en los mares. Algunas algas verdes, como la *Spirogyra*, forman filamentos delgados a partir de cadenas largas de células (**FIGURA 20-20a**). Otras especies de algas verdes forman colonias que contienen grupos de células, los cuales son interdependientes y que constituyen una estructura intermedia entre las formas unicelulares y multicelulares. Estas colonias pueden estar constituidas por unas cuantas células o por varios miles de ellas, como sucede en la especie *Volvox*. Casi todas las algas verdes son pequeñas, pero algunas especies marinas son de mayor tamaño. Por ejemplo, el alga verde *Ulva,* o lechuga de mar, tiene un tamaño similar al de las hojas de lechuga de tierra (**FIGURA 20-20b**).

Las algas verdes son de especial interés porque, a diferencia de otros grupos que contienen protistas multicelulares y fotosintéticos, están estrechamente emparentadas con las plantas. De hecho, las plantas y algunos tipos de algas verdes comparten un ancestro común; muchos investigadores creen que las plantas más primitivas eran parecidas a las algas verdes multicelulares de la actualidad.

a)



b)

FIGURA 20-20 Algas verdes
a) La *Spirogyra* es un alga verde filamentosa compuesta por hebras que tienen el espesor de una sola célula. ***b)*** *Ulva* es un alga verde multicelular que tiene la forma de una hoja.

CONEXIONES EVOLUTIVAS

Nuestros ancestros unicelulares

Algunos de los microbios actuales probablemente son bastante parecidos a las especies primitivas que dieron origen a los organismos multicelulares complejos que ahora son los habitantes más sobresalientes de la Tierra. Por ejemplo, el aspecto exterior de muchos procariotas modernos básicamente no se distingue de las células fosilizadas de hace más de 3,500 millones de años. De manera similar, el metabolismo de las actuales arqueas anaeróbicas y amantes del calor probablemente es semejante a los métodos para captar energía empleados por los primitivos habitantes de la Tierra, mucho antes de que hubiera oxígeno en la atmósfera. Asimismo, las modernas bacterias púrpura sulfurosas y las cianobacterias probablemente no son tan diferentes de los primeros organismos fotosintéticos que aparecieron hace más de 2 mil millones de años.

La vida quizá aún consistiría sólo de organismos unicelulares procarióticos si los protistas con su radical diseño eucariótico no hubieran surgido hace casi 2 mil millones de años. Como aprendiste por medio de la explicación acerca de la teoría endosimbiótica en el capítulo 17, las células eucarióticas se originaron cuando un procariota, tal vez una bacteria capaz de efectuar respiración aeróbica, se instaló en el interior de un socio, formando así la primera "mitocondria". Una fusión separada pero igualmente crucial pudo haber tenido lugar cuando una bacteria fotosintética (quizá parecida a una cianobacteria) tomó como residencia el interior de un socio que no era fotosintético, para convertirse en el primer "cloroplasto". Los cimientos de la multicelularidad se basaron en la célula eucariótica, cuya complejidad permitió la especialización de células enteras para desempeñar funciones específicas dentro de un conglomerado multicelular. Así, casi con certeza se puede afirmar que los protistas primitivos —algunos de los cuales absorbían nutrimentos del ambiente, otros los fotosintetizaban y otros más consumían el alimento en trozos— siguieron trayectorias evolutivas divergentes que condujeron a la formación de los tres reinos multicelulares (hongos, plantas y animales), que son materia de los siguientes cuatro capítulos.

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO EL MONSTRUO VERDE

Caulerpa taxifolia, el alga marina que amenaza con invadir el mar Mediterráneo, es un alga verde. Esta especie y otros miembros del mismo género tienen cuerpos muy inusuales. Exteriormente parecen plantas con estructuras con forma de raíces que se adhieren al suelo marino; además, poseen otras estructuras parecidas a tallos y hojas que crecen hasta varias pulgadas de alto. A pesar de su gran parecido con las plantas, el cuerpo de la *Caulerpa* consiste en una única célula extremadamente grande. Todo el cuerpo está rodeado por una sola membrana celular continua. En su interior hay citoplasma que contiene numerosos núcleos celulares, pero no está subdividido. Es un hecho extraordinario el que una sola célula tome una forma tan compleja.

Un problema potencial con la organización unicelular de la *Caulerpa* surge cuando se daña su cuerpo, quizá por la acción de las olas o cuando un depredador le da un mordisco. Cuando la membrana celular se rompe, no hay nada que evite que todo el contenido del citoplasma se derrame, un suceso que resulta fatal. Pero la *Caulerpa* ha desarrollado un mecanismo de defensa contra esta calamidad potencial. Casi inmediatamente después de que se rompe la membrana celular, se llena de inmediato con un "tapón" que cierra la herida. Una vez que el tapón queda en el sitio correspondiente, la célula comienza a crecer y a regenerar cualquier porción perdida del cuerpo.

Esta capacidad para regenerarse es un componente clave de la habilidad de las cepas de acuario de la *Caulerpa taxifolia* para propagarse rápidamente en nuevos ambientes. Si una parte de su cuerpo se rompe y se mueve hacia una nueva ubicación, se regenera por completo. El individuo regenerado es el fundador de una nueva colonia de rápido crecimiento.

Y estas colonias que proliferan rápidamente pueden aparecer en cualquier lado del mundo. Las autoridades de muchos países se muestran preocupadas porque las cepas de acuario de la *Caulerpa* puedan invadir sus aguas costeras, transportadas inadvertidamente por los barcos que navegan por el mar Mediterráneo o liberadas por un descuido de los encargados de los acuarios. De hecho, la *Caulerpa* invasora ya no está confinada solamente al mar Mediterráneo, porque se ha encontrado en dos sitios costeros de California y cuando menos en ocho cuerpos de agua de Australia. Las autoridades locales de ambos países han intentado controlar a esta alga invasora, pero es imposible decir si sus esfuerzos tendrán éxito. La *Caulerpa taxifolia* es un adversario con muchos recursos.

Piensa en esto ¿Es importante detener la diseminación de la *Caulerpa*? Los gobiernos invierten recursos sustanciales para combatir las especies introducidas y evitar que sus poblaciones aumenten y se dispersen. ¿Cómo aconsejarías que se invirtieran esos fondos? ¿Puedes pensar en algunos argumentos en contra de no desperdiciar el tiempo y el dinero empleados para este propósito?

REPASO DEL CAPÍTULO

RESUMEN DE CONCEPTOS CLAVE

20.1 ¿Qué son los protistas?

"Protista" es un término acomodaticio que se refiere a cualquier eucariota que no es planta, animal u hongo. La mayoría de los protistas son células únicas eucarióticas altamente complejas, pero algunas forman colonias y otras, como las algas marinas, son multicelulares. Los protistas muestran diversos modos de nutrición, reproducción y locomoción. Los protistas fotosintéticos forman gran parte del fitoplancton, el cual desempeña un papel ecológico clave. Algunos protistas causan enfermedades en el hombre, y otros son parásitos de los cultivos.

20.2 ¿Cuáles son los principales grupos de protistas?

Los grupos de protistas incluyen los excavados (diplomónadas y parabasálidos), euglenozoos (eugénidos y kinetoplástidos), stramenopiles (mohos acuáticos, diatomeas y algas pardas), alveolados (dinoflagelados, aplicomplexa y ciliados), cercozoos (que incluyen los foraminíferos), amebozoos (amibas y mohos deslizantes), algas rojas y algas verdes (los parientes más cercanos de las plantas).

Web tutorial 20.1 El ciclo vital del parásito que provoca la malaria

TÉRMINOS CLAVE

algas *pág. 389*
alveolados *pág. 393*
amebozoos *pág. 397*
amibas *pág. 397*
apicomplexa *pág. 394*
cercozoos *pág. 395*
ciliados *pág. 395*
cilios *pág. 395*
diatomeas *pág. 392*
dinoflagelados *pág. 394*
diplomónadas *pág. 390*
euglénidos *pág. 391*
euglenozoos *pág. 391*
excavados *pág. 390*
fitoplancton *pág. 393*
foraminíferos *pág. 396*
kinetoplástidos *pág. 392*
moho acuático *pág. 392*
moho deslizante acelular *pág. 397*
moho deslizante celular *pág. 398*
parabasálidos *pág. 391*
plasmodio *pág. 397*
protistas *pág. 388*
protozoos *pág. 389*
radiolarios *pág. 396*
seudoplasmodio *pág. 398*
seudópodos *pág. 389*
stramenopiles *pág. 392*

RAZONAMIENTO DE CONCEPTOS

1. Menciona las principales diferencias entre procariotas y protistas.
2. ¿Qué es la endosimbiosis secundaria?
3. ¿Cuál es la importancia de los dinoflagelados en los ecosistemas marinos? ¿Qué puede suceder cuando se reproducen con rapidez?
4. ¿Cuál es el principal papel ecológico que desempeñan las algas unicelulares?
5. ¿Cuál grupo de protistas consta en su totalidad de formas parásitas?
6. ¿Cuáles grupos de protistas incluyen las algas marinas?
7. ¿Cuáles grupos de protistas incluyen las especies que emplean seudópodos?

APLICACIÓN DE CONCEPTOS

1. Las investigaciones recientes han demostrado que las aguas oceánicas alejadas de las costas del sur de California se han calentado de 1 a 1.5°C durante las últimas cuatro décadas, posiblemente como resultado del efecto invernadero. Este calentamiento ha ocasionado de forma indirecta una escasez de nutrimentos en el agua y, por consiguiente, una declinación en los protistas fotosintéticos como las diatomeas. ¿Qué efectos tendrá ese calentamiento sobre la vida en los océanos?
2. La estructura interna de muchos protistas es bastante más compleja que la de las células de los organismos multicelulares. ¿Esto significa que los protistas realizan actividades más complejas que los organismos multicelulares? Si no es así, ¿por qué las células de los protistas son más complejas?
3. ¿Por qué la vida de los animales multicelulares sería imposible si no existieran los organismos procarióticos y protistas?

PARA MAYOR INFORMACIÓN

Amato, I. "Plankton Planet". *Discover*, agosto de 2004. Una revisión breve de los organismos que componen el fitoplancton. Incluye hermosas fotografías.

Jacobs, W. "Caulerpa". *Scientific American,* diciembre de 1994. Una descripción de la estructura y fisiología características de la *Caulerpa*, por parte de un científico que ha estudiado estos protistas durante décadas.

Raloff, J. "Taming Toxins". *Science News*, noviembre de 2002. Describe una posible nueva estrategia para combatir la marea roja y otros dinoflagelados tóxicos.

CAPÍTULO 21

La diversidad de las plantas

Esta enorme flor de la *Rafflesia arnoldii* con olor putrefacto es una atracción para quienes visitan los bosques húmedos asiáticos.

DE UN VISTAZO

ESTUDIO DE CASO: La reina de los parásitos

21.1 ¿Cuáles son las principales características de las plantas?

En las plantas se alternan las generaciones multicelulares haploides y diploides

Las plantas tienen embriones multicelulares y dependientes

Las plantas desempeñan un papel ecológico fundamental

Las plantas satisfacen las necesidades de los humanos y halagan sus sentidos

21.2 ¿Cuál es el origen evolutivo de las plantas?

Las algas verdes dieron origen a las plantas terrestres

Los ancestros de las plantas vivieron en aguas dulces

21.3 ¿Cómo se adaptaron las plantas a la vida en la Tierra?

El cuerpo de las plantas resiste la gravedad y la sequía

Los embriones de las plantas están protegidos y sus células sexuales se dispersan en ausencia de agua

21.4 ¿Cuáles son los principales grupos de plantas?

Las briofitas carecen de estructuras de conducción

Las plantas vasculares tienen vasos conductores que también brindan sostén

Las plantas vasculares sin semilla incluyen los licopodios, las colas de caballo y los helechos

Las plantas con semilla dominan la tierra con la ayuda de dos adaptaciones importantes: el polen y las semillas

Las gimnospermas son plantas con semilla que carecen de flores

Las angiospermas son plantas con semilla que dan flores

Las plantas que evolucionaron más recientemente tienen gametofitos más pequeños

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO: La reina de los parásitos

ESTUDIO DE CASO LA REINA DE LOS PARÁSITOS

LA FLOR DE LA *Rafflesia arnoldii* provoca una fuerte impresión por una razón: es enorme. Una sola flor puede llegar a medir un metro de diámetro. Además, tiene una apariencia extraña, pues consiste principalmente en lóbulos carnosos parecidos a los hongos. Pero lo que hace a la flor de la *Rafflesia arnoldii* imposible de ignorar es su aroma, que se ha descrito como "un olor penetrante, más repulsivo que un cadáver de búfalo en avanzado estado de descomposición". Aunque para los seres humanos ese olor es completamente repugnante, resulta atractivo para las moscas de la carroña y otros insectos que normalmente se alimentan de carne en descomposición, donde depositan sus huevecillos. Cuando tales insectos visitan una flor masculina de la *Rafflesia arnoldii* su cuerpo se impregna del polen que puede fertilizar una flor femenina cercana.

Un examen más detallado de la *Rafflesia arnoldii* revela que carece de hojas, raíces y tallos. De hecho, es un parásito y su cuerpo se incrusta completamente en los tejidos de su huésped, una planta del género *Tetrastigma*. Sin hojas, la *Rafflesia arnoldii* es incapaz de producir alimento, por lo que extrae todos los nutrimentos que necesita de su huésped. El parásito se vuelve visible fuera del cuerpo del huésped sólo cuando alguno de sus capullos en forma de col empuja a través de la superficie del tallo del huésped; entonces, su flor gigante y de olor fétido se abre durante una semana para luego marchitarse y desprenderse. Si una flor masculina y otra femenina se abren y se cierran simultáneamente, la flor femenina puede ser fecundada y producir semillas. Una semilla que se dispersa en el excremento de animales y cae en el tallo de una *Tetrastigma* germinará y entrará en un nuevo huésped.

Cuando se habla de plantas, a menudo pensamos en su característica más obvia: hojas verdes que captan energía solar mediante fotosíntesis. Por eso parecerá extraño que este capítulo acerca de las plantas comience con la descripción de una planta tan peculiar que no realiza fotosíntesis. Sin embargo, rarezas como la *Rafflesia arnoldii* sirven para recordarnos que la evolución no siempre sigue una trayectoria predecible y que incluso una adaptación tan valiosa como la capacidad de vivir a partir de la luz solar puede descartarse.

21.1 ¿CUÁLES SON LAS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LAS PLANTAS?

Las plantas son los seres vivos más notorios en casi cualquier paisaje terrestre. A menos que nos encontremos en una región polar, un desolado desierto o una zona urbana densamente poblada, vivimos rodeados de plantas. Las plantas que dominan los bosques, las sabanas, los parques, las praderas, los huertos y las granjas de la Tierra son elementos tan familiares del telón de fondo de nuestra vida cotidiana que tendemos a ignorarlas. Pero si dedicamos un poco de tiempo a observar nuestras verdes compañeras más de cerca, seguramente apreciaremos más las adaptaciones responsables de su éxito y las propiedades que las hacen esenciales para nuestra supervivencia.

¿Qué distingue a los miembros del reino vegetal de otros organismos? Quizá la característica más notable de las plantas es su color verde. El color proviene de la presencia del pigmento de la clorofila en muchos tejidos vegetales. La clorofila desempeña un papel crucial en la fotosíntesis, el proceso por el que las plantas aprovechan la energía de la luz solar para convertir el agua y el dióxido de carbono en azúcares. Sin embargo, la clorofila y la fotosíntesis no son exclusivas de las plantas, ya que también se presentan en muchos tipos de protistas y procariotas. Más bien, el rasgo distintivo de las plantas es su ciclo reproductivo, que se caracteriza por la *alternancia de generaciones*.

En las plantas se alternan las generaciones multicelulares haploides y diploides

El ciclo vital de las plantas se caracteriza por la **alternancia de generaciones** (FIGURA 21-1), en la que se alternan generaciones diploides y haploides individuales. (Recordemos que un organismo diploide tiene dos juegos de cromosomas; un organismo haploide, un juego). En la generación diploide, el cuerpo de la planta se compone de células diploides y se conoce como **esporofito**. Ciertas células de los esporofitos experimentan meiosis para producir células reproductivas haploides llamadas *esporas*. Estas esporas haploides se desarrollan hasta convertirse en plantas haploides multicelulares llamadas **gametofitos**.

Finalmente, los gametofitos producen *gametos* haploides masculinos y femeninos por mitosis. Los gametos son células reproductivas, al igual que las esporas, pero, a diferencia de estas últimas, un gameto individual por sí solo no puede desarrollarse para convertirse en un nuevo individuo. En vez de ello, dos gametos de sexo opuesto deben encontrarse y fusionarse para formar un nuevo individuo. En las plantas, los gametos producidos por gametofitos se fusionan para formar un **cigoto** diploide, que se desarrolla hasta constituir un esporofito diploide, y el ciclo se inicia de nuevo.

Las plantas tienen embriones multicelulares y dependientes

En las plantas, los cigotos se desarrollan en embriones multicelulares que permanecen dentro de la planta progenitora de cuyos tejidos reciben nutrimentos. Esto es, el embrión permanece adherido a la planta progenitora y es dependiente de ésta conforme crece y se desarrolla. Tales embriones multicelulares y dependientes no se encuentran entre los protistas fotosintéticos, de manera que esta característica distingue a las plantas de sus más cercanos parientes entre las algas.

Las plantas desempeñan un papel ecológico fundamental

Las plantas proveen alimento, ya sea de forma directa o indirecta, a todos los animales, hongos y microbios no fotosintéticos terrestres. Las plantas utilizan la fotosíntesis para captar la energía solar y convierten parte de esa energía en hojas, retoños, semillas y frutos que sirven de alimento a otros organismos. Muchos de estos consumidores de tejidos vegetales, a la vez, sirven de alimento a otros organismos. Las plantas son los principales proveedores de energía y nutrimentos a los ecosistemas terrestres, y toda la vida terrestre depende de la capacidad de las plantas para fabricar alimentos a partir de la luz solar.

Además de su papel como proveedores de alimento, las plantas hacen otras contribuciones esenciales a los demás organismos. Por ejemplo, generan oxígeno como un subproducto de la fotosíntesis y, al hacerlo, reponen continuamente el oxígeno de la atmósfera. Sin la contribución de las plantas,

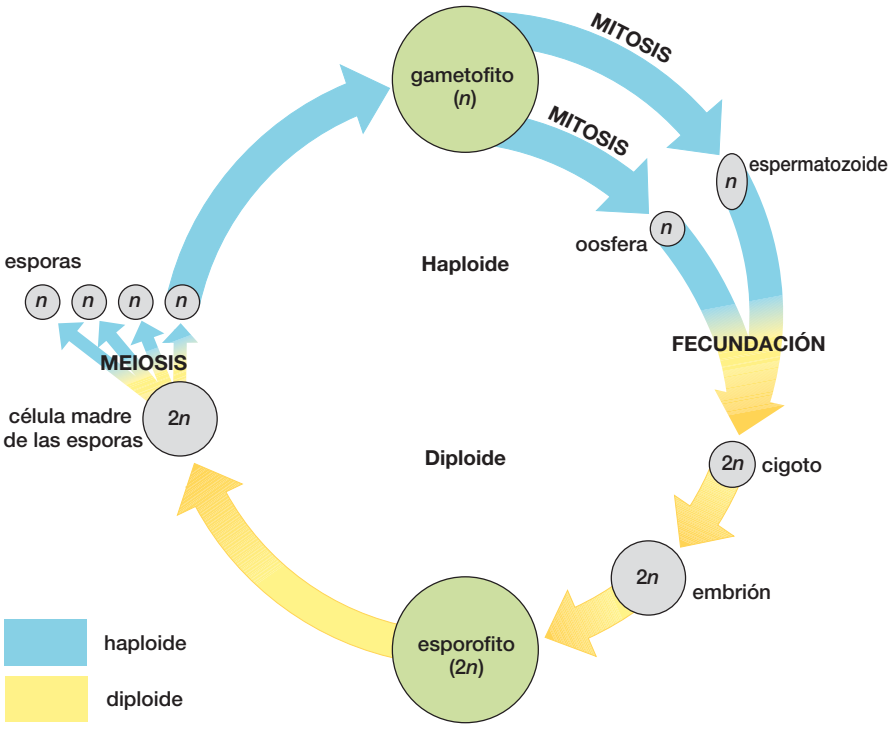


FIGURA 21-1 Alternancia de generaciones en las plantas
Como se muestra en esta representación generalizada del ciclo vital de una planta, la generación esporofítica diploide produce esporas haploides por meiosis. Las esporas se desarrollan hasta dar origen a una generación gametofítica haploide que produce gametos haploides por mitosis. El resultado de la fusión de estos gametos es un cigoto diploide que se transforma en la planta esporofítica.

el oxígeno atmosférico se agotaría rápidamente como resultado de la respiración que consume oxígeno por parte de una multitud de organismos sobre la Tierra.

Las plantas también ayudan a crear y mantener el suelo. Cuando una planta muere, sus tallos, hojas y raíces se convierten en alimento para los hongos, procariotas y otros organismos encargados de la descomposición. Gracias al proceso de descomposición, los tejidos de las plantas se degradan en diminutas partículas de materia orgánica que constituyen parte del suelo. La materia orgánica mejora la capacidad del suelo de retener agua y nutrimentos, haciéndolo más fértil y más capaz de contribuir al crecimiento de las plantas vivas. Las raíces de estas últimas ayudan a conservarlas en su lugar y a mantener la consistencia de la tierra Los suelos de los cuales se ha eliminado la vegetación son susceptibles a la erosión del viento y el agua.

Las plantas satisfacen las necesidades de los humanos y halagan sus sentidos

Todos los habitantes de los ecosistemas terrestres dependen de las contribuciones de las plantas, pero la dependencia de los seres humanos en relación con las plantas es especialmente notoria. Sería difícil exagerar el grado en que las poblaciones humanas dependen de las plantas. Ni la explosión demográfica ni nuestro rápido avance tecnológico serían posibles sin las plantas.

Las plantas proveen refugio, combustible y medicinas

Las plantas son el origen de la madera que se utiliza para construir casas para una gran parte de la población humana. Durante buena parte de la historia de la humanidad, la madera fue también el principal combustible para calentar los hogares y para cocinar. La madera sigue siendo el combustible más importante en muchos lugares del mundo. El carbón, otro combustible importante, se compone de los restos de plantas antiguas que se han transformado como resultado de procesos geológicos.

Las plantas también suministran muchos medicamentos de los que depende el cuidado de la salud en la actualidad. Medicamentos importantes que originalmente se encontraron y se extrajeron de las plantas incluyen la aspirina, el medicamento para el corazón llamado digitalina, el Taxol ® y la vinblastina, que se utilizan en el tratamiento contra el cáncer; la quinina, que combate la malaria, así como los analgésicos codeína y morfina, entre muchos otros medicamentos.

Además de extraer sustancias útiles de las plantas silvestres, los humanos han domesticado una multitud de especies vegetales útiles. A través de generaciones de cruza selectiva, los humanos han modificado las semillas, los tallos, las raíces, las flores y los frutos de especies seleccionadas para obtener alimento y fibra. Es difícil imaginar la vida sin el maíz, el arroz, las papas, las manzanas, los tomates, el aceite para cocinar, el algodón y la infinidad de alimentos básicos que las plantas domésticas nos suministran.

Las plantas brindan placer

A pesar de las obvias contribuciones de las plantas al bienestar de los seres humanos, nuestra relación con ellas parece estar basada en algo más profundo que en su capacidad para ayudarnos a satisfacer nuestras necesidades materiales. Aunque apreciamos el valor práctico del trigo y la madera, nuestras conexiones emocionales más poderosas con las plantas son puramente sensuales. Muchos de los placeres de la vida llegan a nosotros por cortesía de nuestras compañeras las plantas. Nos deleitamos con la belleza y la fragancia de las flores y las presentamos a otros como símbolo de nuestras emociones más sublimes e inefables. Muchos de nosotros dedicamos horas enteras de nuestro tiempo de ocio a cuidar de los jardines y céspedes, sin otra recompensa que el placer y la satisfacción que obtenemos al observar los frutos de nuestro trabajo. En nuestras casas, reservamos un espacio no sólo para los miembros de la familia, sino también para las plantas. Nos sentimos impulsados a alinear las calles con árboles y buscamos refugio del estrés de la vida cotidiana en parques con abundante vegetación. Nuestras mañanas se enriquecen con el aroma del café o el té y nuestras noches con un buen vaso de vino. Es evidente que las plantas nos ayudan a cumplir nuestros deseos, tanto como nuestras necesidades.

21.2 ¿CUÁL ES EL ORIGEN EVOLUTIVO DE LAS PLANTAS?

Los ancestros de las plantas fueron protistas fotosintéticos, que muy probablemente eran similares a las algas que conocemos en la actualidad. Al igual que las algas modernas, los organismos que dieron origen a las plantas carecían de raíces, tallos y hojas verdaderas, y también de estructuras reproductoras complejas como flores o conos. Todas estas características aparecieron en una etapa más tardía de la historia evolutiva de las plantas. (FIGURA 21-2).

Las algas verdes dieron origen a las plantas terrestres

De los diferentes grupos de algas actuales, las verdes son probablemente las que más se asemejan a las plantas ancestrales. Esta suposición se basa en la estrecha relación filogenética entre los dos grupos. Las comparaciones de DNA han mostrado que las algas verdes son los parientes vivos más próximos de las plantas, y la hipótesis de que las plantas terrestres evolucionaron a partir de algas verdes ancestrales también recibe apoyo de otro tipo de evidencias. Por ejemplo, las algas verdes y las plantas utilizan el mismo tipo de clorofila y de pigmentos auxiliares en la fotosíntesis. Además, tanto las plantas como las algas verdes almacenan alimento en forma de almidón y sus paredes celulares están constituidas de celulosa. En contraste, los pigmentos fotosintéticos, las moléculas de almacenamiento de alimentos y las paredes celulares de otros protistas fotosintéticos, como las algas rojas y las pardas, difieren de los de las plantas.

Los ancestros de las plantas vivieron en aguas dulces

La mayoría de las algas verdes viven principalmente en aguas dulces, lo que sugiere que la historia evolutiva primitiva de las plantas tuvo lugar en entornos de agua dulce. En contraste con las condiciones ambientales casi constantes del océano, los cuerpos de agua dulce son sumamente variables. La temperatura del agua fluctúa con las estaciones o incluso diariamente, y los niveles variables de precipitación pluvial y de evaporación dan origen a fluctuaciones en la concentración de sustancias químicas, o incluso a periodos en los que el hábitat acuático se seca. Las antiguas algas verdes de agua dulce deben haber adquirido por evolución características que

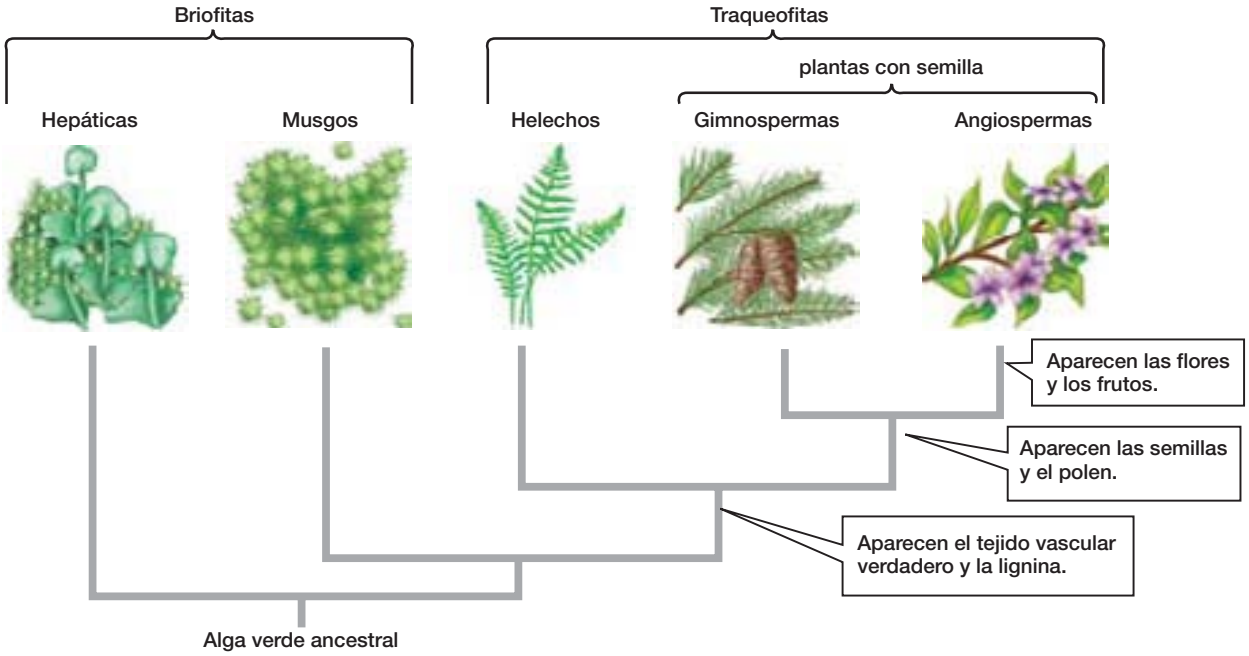


FIGURA 21-2 Árbol evolutivo de algunos de los principales grupos de plantas

les permitieron soportar temperaturas extremas y periodos de sequía. Estas adaptaciones a las dificultades de la vida en el agua dulce fueron el fundamento para que los descendientes de las algas primitivas desarrollaran las características que hicieron posible la vida en el medio terrestre.

21.3 ¿CÓMO SE ADAPTARON LAS PLANTAS A LA VIDA EN LA TIERRA?

La mayoría de las plantas viven en el medio terrestre, lo que representa muchas ventajas para ellas, incluido el libre acceso a la luz solar. El agua, en cambio, habría bloqueado los rayos solares y el acceso a nutrimentos contenidos en las rocas superficiales. Sin embargo, estas ventajas tienen un costo. En el medio terrestre no existe la fuerza de flotación que brinda el agua, el cuerpo de las plantas no está rodeado de una solución de nutrimentos y el aire tiende a secarlas. Además, los gametos (células sexuales) y los cigotos (células sexuales fecundadas) no pueden ser transportados por las corrientes de agua o impulsados por medio de flagelos, como sucede con muchos organismos acuáticos. Como resultado, la vida en el medio terrestre ha favorecido en las plantas la evolución de estructuras que dan sostén al cuerpo y permiten conservar el agua, de los vasos que transportan el agua y los nutrimentos a toda la planta, y de procesos que dispersan los gametos y cigotos por métodos que son independientes del agua.

El cuerpo de las plantas resiste la gravedad y la sequía

- Una **cutícula** cérea que recubre la superficie de hojas y tallos y limita la evaporación de agua.
- Poros llamados **estomas** en las hojas y los tallos, que se abren para permitir el intercambio de gases y se cierran cuando el agua escasea, con el fin de reducir la pérdida de agua por evaporación.

Otras adaptaciones fundamentales tuvieron lugar en etapas más tardías de la transición a la vida terrestre y ahora están muy extendidas, aunque no se presentan en todas las plantas (la mayoría de las plantas no vasculares, un grupo que se describirá más adelante, carecen de ellas):

- Vasos conductores que transportan agua y sales minerales hacia arriba desde las raíces y que llevan los productos de la fotosíntesis de las hojas al resto de la planta.
- La sustancia endurecedora llamada **lignina**, un polímero rígido que impregna los vasos conductores y sostiene el cuerpo de la planta, lo que le permite exponer una máxima área superficial a la luz solar.

Los embriones de las plantas están protegidos y sus células sexuales se dispersan en ausencia de agua

Todas las plantas protegen sus embriones en desarrollo dentro de ciertos tejidos de las plantas progenitoras, pero los grupos de plantas más comunes se caracterizan por tener embriones especialmente bien protegidos y con suficiente cantidad de provisiones, y por dispersar sus células sexuales sin la ayuda del agua. Las adaptaciones fundamentales de estos grupos de plantas son el *polen*, las *semillas* y, en las plantas que florecen, las *flores* y los *frutos*

persar el polen con más precisión que el viento. Por su parte, los frutos atraían a los animales que se alimentaban de ellos y dispersaban en sus heces las semillas que no podían digerir.

21.4 ¿CUÁLES SON LOS PRINCIPALES GRUPOS DE PLANTAS?

Dos grupos principales de plantas terrestres surgieron a partir de las antiguas algas (tabla 21-1). Uno de ellos, el grupo de las **briofitas** (también conocidas como *plantas no vasculares*), necesita un medio húmedo para reproducirse, por lo que constituye un puente entre la vida acuática y la terrestre, de manera análoga a los anfibios en el reino animal. El otro grupo, el de las plantas **vasculares** (también llamadas *traqueofitas*), ha conseguido colonizar ambientes más secos.

Las briofitas carecen de estructuras de conducción

Las briofitas conservan algunas de las características de las algas que les dieron origen: carecen de raíces, hojas y tallos verdaderos; poseen estructuras de anclaje semejantes a raíces, llamadas *rizoides*, que introducen agua y nutrimentos en el cuerpo de la planta. Las briofitas son no vasculares, pues carecen de estructuras bien desarrolladas para conducir agua y nutrimentos. Por esa razón, dependen de una difusión lenta o de tejidos conductores poco desarrollados para distribuir agua y otros nutrimentos. En consecuencia, el tamaño de su cuerpo es limitado. Otro factor limitante del tamaño corporal es la ausencia de algún agente endurecedor; sin este material, las briofitas no pueden crecer mucho hacia arriba. La mayoría de ellas no alcanzan más de 2.5 centímetros de altura.

Las briofitas incluyen antocerotas, hepáticas y musgos

Las briofitas incluyen tres *fila*: antocerotas, hepáticas y musgos. Las antocerotas y las hepáticas se llaman así por sus formas. Las esporofitas antocerotas generalmente tienen una forma puntiaguda que a los ojos de los observadores simula un cuerno (FIGURA 21-3a). Los gametofitos de ciertas especies de hepáticas tienen forma de lóbulo que recuerda a la forma de un hígado (FIGURA 21-3b). Las antocerotas y las hepáticas abundan en regiones de gran humedad, como los bosques húmedos y cerca de las riberas de arroyos y estanques.

Los musgos son el filum más diverso y abundante de las briofitas (FIGURA 21-3c). Al igual que las antocerotas y las hepáticas, los musgos se encuentran casi siempre en lugares húmedos. Sin embargo, algunos musgos tienen una cubierta impermeable que retiene la humedad evitando la pérdida de agua. Además, muchos de estos musgos también son capaces de sobrevivir a la pérdida de buena parte del agua en sus organismos; se deshidratan y permanecen en estado latente durante periodos de sequía, pero absorben agua y reanudan su crecimiento cuando se restablecen las condiciones de humedad. Tales musgos logran sobrevivir en desiertos, sobre rocas desnudas y en latitudes meridionales donde hay muy poca humedad y el agua líquida escasea durante gran parte del año.

Los musgos del género *Sphagnum* proliferan especialmente en lugares húmedos de las regiones septentrionales alrededor del mundo. En muchos de estos hábitat, el *Sphagnum* es la planta más abundante al formar esteras de gran extensión (FIGURA 21-3d). Puesto que la descomposición es lenta en los climas fríos y estos musgos contienen compuestos que inhiben la proliferación de bacterias, el *Sphagnum* sin vida se descompone muy lentamente. Como resultado, los tejidos de musgos parcialmente descompuestos se acumulan en depósitos que, al cabo de miles de años, llegan a medir varios metros de grosor. Estos depósitos se conocen como turba, que se recolecta para utilizarse como combustible, una práctica que continúa hasta nuestros días en algunas regiones del hemisferio norte. Sin embargo, en la actualidad la turba se recolecta con mayor frecuencia para utilizarse en horticultura. La turba seca puede absorber muchas veces su propio peso en agua, lo

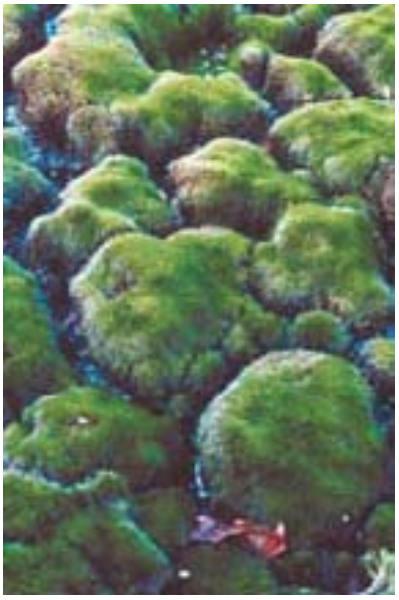
Tabla 21-1 Características de los principales grupos de plantas

Grupo	Subgrupo	Relación entre el esporofito y el gametofito	Transferencia de células reproductoras	Desarrollo embrionario inicial	Dispersión	Estructuras de transporte de agua y nutrimentos
Briofitas		Gametofito dominante: el esporofito se desarrolla a partir del cigoto	El espermatozoide móvil nada hacia la oosfera inmóvil retenida en el gametofito	Se lleva a cabo dentro del arquegonio del gametofito	Esporas haploides arrastradas por el viento	Ausentes
Plantas vasculares	Helechos	Esporofito dominante: se desarrolla a partir del cigoto retenido en el gametofito	El espermatozoide móvil nada hacia la oosfera inmóvil retenida en el gametofito	Se lleva a cabo dentro del arquegonio del gametofito	Esporas haploides arrastradas por el viento	Presentes
	Coníferas	Esporofito dominante: el gametofito microscópico se desarrolla dentro del esporofito	El polen, dispersado por el viento transporta los espermatozoides hasta la oosfera inmóvil en el cono	Se lleva a cabo dentro de una semilla protectora que contiene una provisión de alimento	Semillas que contienen el embrión esporofítico diploide dispersadas por el viento o animales	Presentes
	Plantas con flor	Esporofito dominante: el gametofito microscópico se desarrolla dentro del esporofito	El polen, dispersado por el viento o los animales, lleva espermatozoides a la oosfera inmóvil dentro de la flor	Se lleva a cabo dentro de una semilla protectora que contiene una provisión de alimento; la semilla está encerrada en el fruto	Fruto con semillas que son dispersadas por animales, el viento o el agua	Presentes

a)

b)

c)



d)

FIGURA 21-3 Briofitas
Las plantas que se observan aquí miden menos de un centímetro de altura. ***a)*** Los esporofitos en forma de cuerno de las antocerotas crecen hacia arriba a partir de los arquegonios que se encuentran dentro del cuerpo del gametofito. ***b)*** Las hepáticas crecen en zonas sombreadas y húmedas. Esta es la planta gametofítica hembra, con arquegonios en forma de sombrilla que contienen las oosferas. Los espermatozoides deben subir nadando por los "tallos" en una película de agua para fecundar las oosferas. ***c)*** Plantas de musgo en las que se observan los "tallos" con las cápsulas que contienen las esporas. ***d)*** Esteras del musgo *Sphagnum* cubren las ciénagas en regiones septentrionales. PREGUNTA: ¿Por qué las briofitas son tan pequeñas?

que la hace muy útil como abono de la tierra y como material de empaque para transportar plantas vivas.

Las estructuras reproductoras de las briofitas están protegidas

Entre las características de las briofitas que representan adaptaciones a la vida terrestre se cuentan sus estructuras reproductoras protegidas, que evitan que los gametos se sequen. Estas estructuras son de dos tipos: los **arquegonios**, donde se desarrollan las oosferas, y los **anteridios**, donde se forman los espermatozoides (**FIGURA 21-4**). En ciertas especies de briofitas, una misma planta tiene tanto arquegonios como anteridios; en otras especies, cada planta individual es masculina, o bien, femenina.

En todas las briofitas el espermatozoide debe nadar hacia la oosfera —que emite una sustancia química atrayente—, a través de una película de agua. (En el caso de las briofitas que habitan en zonas más secas, su reproducción debe coincidir con la temporada de lluvias). La oosfera fecundada permanece en el arquegonio, donde el embrión crece y madura para convertirse en un pequeño esporofito diploide, que se queda adherido a la planta gametofítica progenitora. En la madurez, el esporofito produce esporas haploides por meiosis dentro de una cápsula. Cuando ésta se abre, las esporas son liberadas

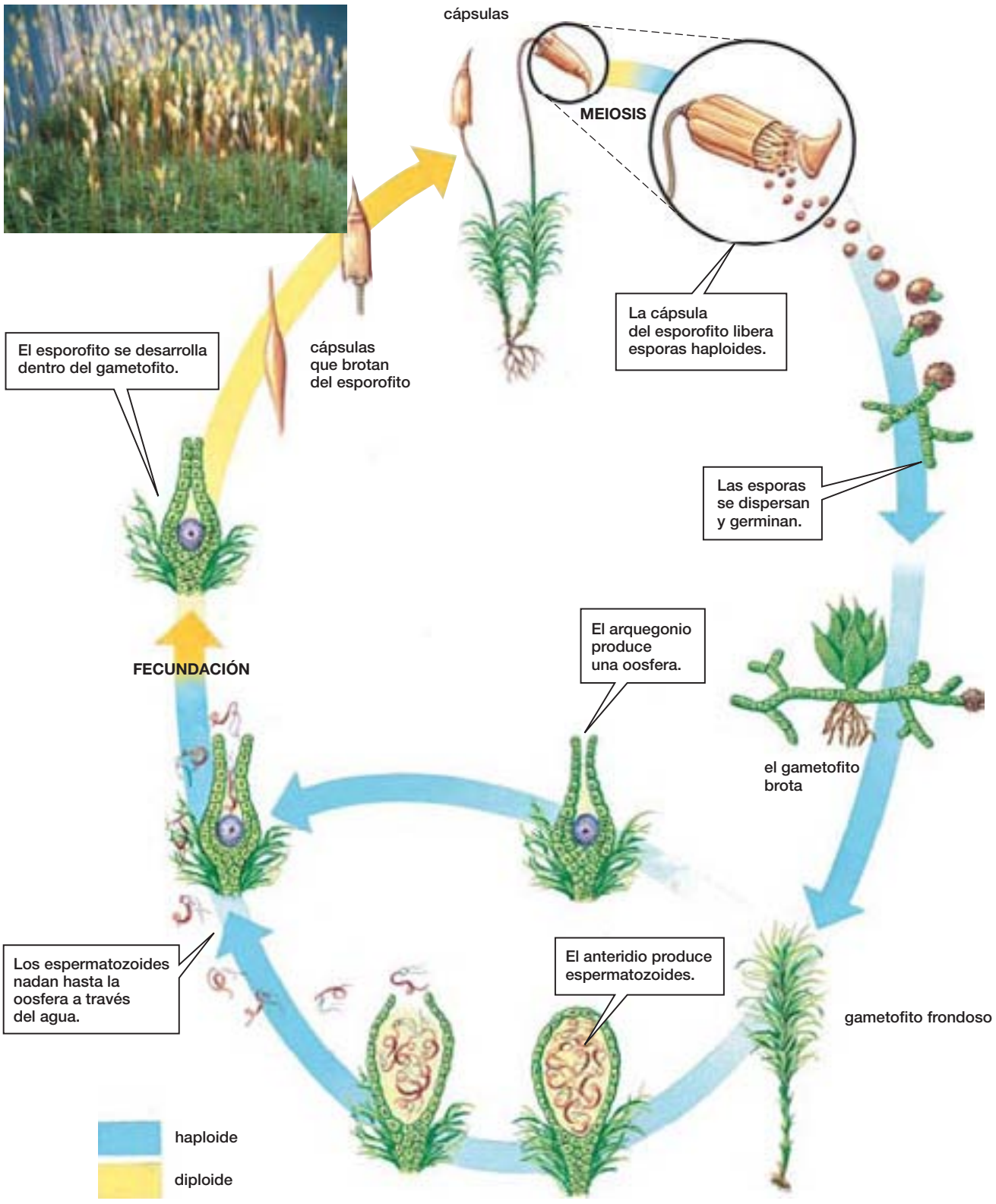


FIGURA 21-4 Ciclo vital de un musgo
El gametofito verde frondoso (abajo a la derecha) es la generación haploide que produce espermatozoides y oosferas. Los espermatozoides deben nadar por una película de agua para llegar a la oosfera. El cigoto se desarrolla hasta convertirse en un esporofito diploide con tallo que emerge de la planta gametofítica. El esporofito tiene como remate una cápsula de color marrón donde se producen esporas haploides por meiosis. Éstas se dispersan y germinan para producir otra generación de gametofitos verdes. (**Imagen en recuadro**) Plantas de musgo. Las plantas verdes, cortas y frondosas son los gametofitos haploides; los tallos de color marrón rojizo son esporofitos diploides.

y dispersadas por el viento. Si una espora cae en un ambiente adecuado, se desarrollará hasta formar otra planta gametofítica haploide.

Las plantas vasculares tienen vasos conductores que también brindan sostén

Las plantas vasculares se distinguen por poseer unos grupos especializados de células conductoras llamadas **vasos**. Los vasos están impregnados de la sustancia endurecedora llamada lignina y desempeñan funciones tanto de sostén como de conducción. Los vasos permiten que las plantas vasculares alcancen mayor altura que las no vasculares, no sólo porque la lignina brinda sostén adicional, sino también porque las células conductoras transportan el agua y los nutrimentos absorbidos por las raíces hacia la parte superior de la planta. Otra diferencia entre las plantas vasculares y las briofitas es que en las primeras, el esporofito diploide es la estructura más grande y notoria; en las plantas no vasculares, el gametofito haploide es más evidente.

Las plantas vasculares se clasifican en dos grupos: las que tienen semillas y las que carecen de ellas.

Las plantas vasculares sin semilla incluyen los licopodios, las colas de caballo y los helechos

Al igual que las briofitas, las plantas vasculares sin semilla tienen espermatozoides que nadan y requieren de un medio acuático para reproducirse. Como indica su nombre, no producen semillas, pues se reproducen mediante esporas. Las plantas actuales sin semilla—licopodios, colas de caballo y helechos—son mucho más pequeñas que sus ancestros, que dominaron el paisaje de nuestro planeta en el periodo carbonífero (que se inició hace unos 350 millones de años y concluyó hace 290 millones de años). En la actualidad quemamos los cuerpos de estas ancestrales plantas vasculares sin semilla —transformados por el calor, la presión y el tiempo— en forma de carbón mineral. Las plantas vasculares sin semilla dominaron alguna vez, pero actualmente son las plantas con semilla, más versátiles, las que ocupan el papel predominante.

Los licopodios y las colas de caballo son pequeños y poco notorios

Los representantes modernos de los licopodios apenas alcanzan unos cuantos centímetros de altura (**FIGURA 21-5a**). Sus hojas son pequeñas y con apariencia de escamas, semejantes a las estructuras con forma de hojas de los musgos. Los licopodios del género *Lycopodium*, comúnmente conocidos como pinillos, constituyen una hermosa cubierta del suelo en algunos bosques templados de coníferas y plantas caducifolias.

Las colas de caballo modernas pertenecen a un solo género, *Equisetum*, que comprende solamente 15 especies, en su mayoría de menos de un metro de altura (**FIGURA 21-5b**). El nombre común de cola de caballo se debe a las frondosas ramas de ciertas especies; las hojas se reducen a pequeñísimas escamas sobre las ramas. También se les conoce como "juncos para fregar", porque los primeros colonizadores europeos de América del Norte las usaban para lavar cazuelas y pisos. Todas las especies de *Equisetum* tienen gran cantidad de sílice (vidrio) depositada en su capa celular externa, lo que les confiere una textura abrasiva.

Los helechos tienen hojas anchas y son más diversos

Los helechos, con 12,000 especies, son las plantas vasculares sin semilla más diversas (**FIGURA 21-5c**). En los trópicos, los helechos arborescentes todavía alcanzan alturas que recuerdan las de sus antepasados del periodo carbonífero (**FIGURA 21-5d**). Los helechos son las únicas plantas vasculares sin semilla con hojas anchas.

En los helechos, las esporas haploides se producen en estructuras llamadas *esporangios*, que se forman en hojas especiales del esporofito (**FIGURA 21-6**). El viento dispersa las esporas y éstas dan origen a diminutas plantas gametofíticas haploides que producen espermatozoides y oosferas. La generación gametofítica conserva dos rasgos que recuerdan a las briofitas. En primer lugar, los pequeños gametofitos carecen de vasos conductores; en segundo, al igual que en el caso de las briofitas, el espermatozoide debe nadar por el agua para alcanzar la oosfera.

Las plantas con semilla dominan la Tierra con la ayuda de dos adaptaciones importantes: el polen y las semillas

Las plantas con semilla se distinguen de las briofitas y de las plantas vasculares sin semilla porque producen polen y semillas. Los granos de **polen** son estructuras diminutas que portan las células productoras de espermatozoides y que son dispersadas por el viento o por animales polinizadores, como las abejas. De esta forma, los espermatozoides viajan a través del aire para fecundar las oosferas. Así que la distribución de las plantas con semilla no está limitada por la necesidad de agua como medio para que los espermatozoides naden hasta la oosfera; las plantas con semilla están plenamente adaptadas a la vida en tierra seca.

De forma análoga a lo que sucede en los huevos de aves y reptiles, las **semillas** se componen de una planta embrionaria, una provisión de alimento para el embrión y una cubierta protectora exterior (**FIGURA 21-7**). La *cubierta de la semilla* mantiene al embrión en un estado de animación suspendida o letargo hasta que las condiciones sean idóneas para el crecimiento. El alimento almacenado sustenta a la planta recién nacida hasta que sus raíces y hojas se desarrollan y es capaz de elaborar su propio alimento mediante fotosíntesis. Algunas semillas poseen adaptaciones complejas que hacen posible su dispersión por medio del viento, el agua y los animales.

En las plantas con semilla, los gametofitos (que producen las células sexuales) son de tamaño diminuto. El gametofito femenino es un pequeño grupo de células haploides que producen una oosfera. El gametofito masculino es el grano de polen.

Las plantas con semilla se agrupan en dos tipos generales: **1.** las *gimnospermas,* que carecen de flores, y **2.** las *angiospermas,* las plantas que dan flores.

Las gimnospermas son plantas con semilla que carecen de flores

Las **gimnospermas** aparecieron antes que las plantas con flor. Las primeras gimnospermas coexitieron con los bosques de plantas vasculares sin semilla que dominaron en el periodo carbonífero. Sin embargo, durante el periodo pérmico que siguió (el cual se inició hace 290 millones de años y concluyó hace 248 millones de años), las gimnospermas fueron el gru-

a)

c)

b)

d)

FIGURA 21-5 Algunas plantas vasculares sin semilla
Las plantas vasculares sin semilla se dan en ambientes boscosos húmedos. ***a)*** Los licopodios (también conocidos como pinillos) crecen en los bosques templados. Este espécimen está liberando esporas. ***b)*** La cola de caballo gigante extiende ramas largas y angostas en una serie de rosetones. Sus hojas se han reducido a escamas insignificantes. A la derecha se observa una estructura cónica formadora de esporas. ***c)*** Las hojas de este helecho del monte brotan de las estructuras con forma de mangos de violín enroscados. ***d)*** Aunque la mayoría de las especies de helechos son pequeñas, algunas, como este árbol de helecho, conservan las enormes dimensiones que eran comunes entre los helechos del periodo carbonífero. PREGUNTA: En cada una de estas fotografías, la estructura que se observa ¿es un esporofito o un gametofito?

po predominante de plantas hasta que surgieron las plantas con flores, más de 100 millones de años después. A pesar de su éxito, la mayoría de aquellas primeras gimnospermas ahora están extintas. En la actualidad sobreviven cuatro *fila* de gimnospermas: ginkgos, cicadáceas, gnetofitas y coníferas.

Sólo sobrevive una especie de ginkgo

Los ginkgos probablemente tienen una larga historia evolutiva, y se diseminaron ampliamente durante el periodo jurásico, que comenzó hace 208 millones de años. Sin embargo, en

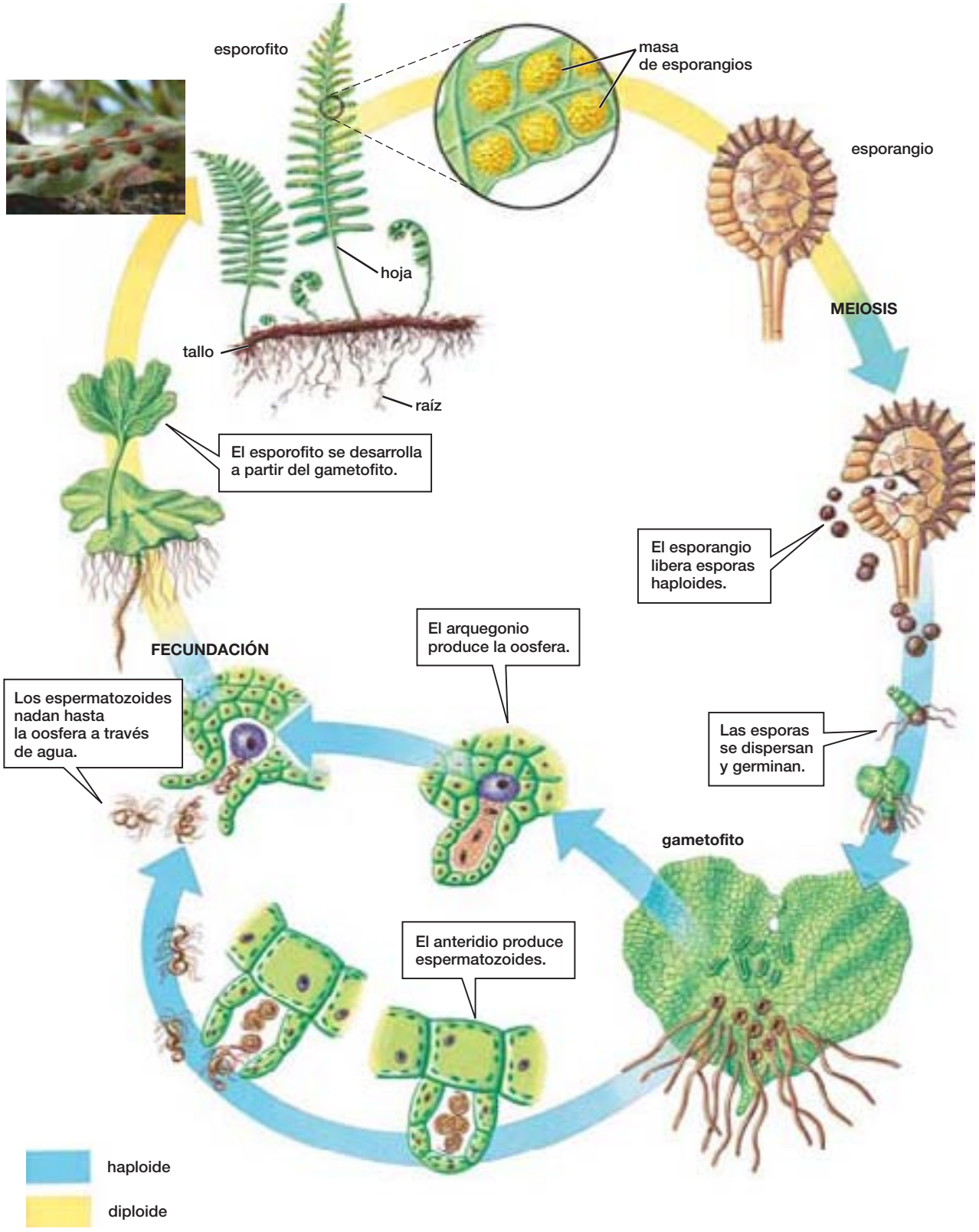
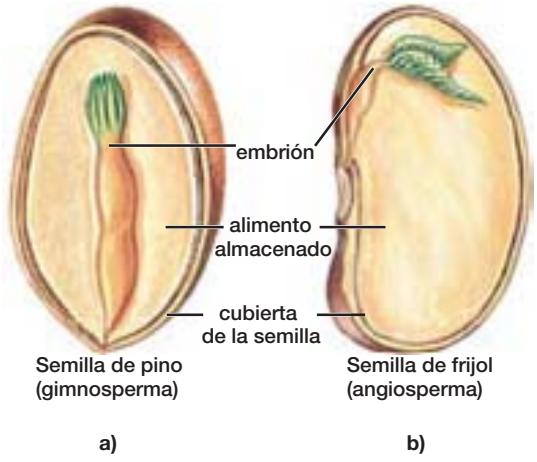


FIGURA 21-6 Ciclo vital de un helecho

El cuerpo de la planta dominante (arriba a la izquierda) es el esporofito diploide. El viento dispersa las esporas haploides —formadas en los esporangios situados en el envés de ciertas hojas—, que germinan en el suelo húmedo del bosque y se transforman en plantas gemetofíticas haploides, las cuales pasan desapercibidas. En la superficie inferior de estos pequeños gametofitos con forma de lámina, los anteridios masculinos y los arquegonios femeninos producen espermatozoides y oosferas. Los espermatozoides deben nadar hasta la oosfera, que permanece en el arquegonio. El cigoto se desarrolla hasta convertirse en una planta esporofítica grande. (**Imagen en recuadro**) Envés de una hoja de helecho, donde se observan grupos de esporangios.



c)

d)

FIGURA 21-7 Semillas
Semillas de ***a)*** una gimnosperma y ***b)*** una angiosperma. Ambas se componen de una planta embrionaria y alimento almacenado encerrado en la cubierta de la semilla. Las semillas presentan diversas adaptaciones con el fin de dispersarse; por ejemplo, ***c)*** las pequeñísimas semillas del diente de león, que flotan en el aire, y ***d)*** las enormes semillas acorazadas (protegidas dentro del fruto) del cocotero, que sobreviven a la inmersión prolongada en agua de mar durante sus travesías por el océano. PREGUNTA: ¿Podrías mencionar algunas adaptaciones que ayudan a proteger las semillas de la destrucción por parte de los animales que las consumen?

la actualidad están representados por una única especie, el *Ginkgo biloba*, también conocido como árbol del cabello de Venus. Los ginkgos son masculinos o femeninos; los árboles femeninos producen semillas carnosas, del tamaño de una cereza y de olor fétido (**FIGURA 21-8a**). Los ginkgos se han conservado por cultivo, especialmente en Asia; de no ser por este cultivo, quizá ya se habrían extinguido. Puesto que son más resistentes a la contaminación que casi todos los demás árboles, se han plantado ginkgos (normalmente árboles masculinos) en muchas ciudades estadounidenses. En tiempos recientes las hojas del ginkgo han ganado fama como remedio herbolario para mejorar la memoria.

Las cicadáceas se restringen a los climas cálidos

Al igual que los ginkgos, las cicadáceas fueron diversas y abundantes durante el periodo jurásico, pero desde entonces sus poblaciones han disminuido. En la actualidad existen aproximadamente 160 especies, la mayoría de las cuales habitan en climas tropicales o subtropicales. Las cicadáceas tienen hojas grandes y finamente divididas; se parecen superficialmente a las palmeras o grandes helechos (**FIGURA 21-8b**). En su mayoría, las cicadáceas alcanzan aproximadamente un metro de altura, pero algunas especies pueden llegar a medir 20 metros. Las cicadáceas crecen con lentitud y viven largo tiempo; un espécimen australiano tiene una edad estimada de 5000 años.

Los tejidos de las cicadáceas contienen potentes toxinas; a pesar de ello, la gente en algunas partes del mundo utiliza las semillas, tallos y raíces como alimento. Una preparación cuidadosa permite eliminar las toxinas antes de que las plantas se consuman. No obstante, se piensa que las toxinas de las cicadáceas son la causa de problemas neurológicos que se presentan con cierta frecuencia en las poblaciones que consumen estas plantas. Las toxinas de las cicadáceas también pueden dañar al ganado que pasta.

Casi la mitad de todas las especies de cicadáceas se encuentra en peligro de extinción. Las principales amenazas para estas plantas son la destrucción del hábitat, la competencia de nuevas especies y la recolección de los cultivos con fines comerciales. Un espécimen de gran tamaño de una cicadácea poco común llega a venderse en miles de dólares. Como las cicadáceas crecen muy lentamente, la recuperación de las poblaciones en peligro de extinción es incierta.

Las gnetofitas incluyen la Welwitschia

Las gnetofitas incluyen unas 70 especies de arbustos, parras y pequeños árboles. Las hojas de las especies de gnetofitas del género *Ephedra* contienen compuestos alcaloides que actúan en los seres humanos como estimulantes y supresores del apetito. Por esta razón, la *Ephedra* se utiliza ampliamente para aumentar la energía y como un agente para perder peso. Sin embargo, luego de los reportes de muerte súbita entre los consumidores de *Ephedra* y de la publicación de varios estudios que vinculan su consumo con el aumento del riesgo de sufrir problemas cardiacos, la Agencia de Fármacos y Alimentos (Food and Drug Administration, FDA) de Estados Unidos prohibió la venta de productos que contienen *Ephedra*.

La gnetofita *Welwitschia mirabilis* está entre las plantas más distintivas (**FIGURA 21-8c**). La *Welwitschia*, que se encuentra sólo en los desiertos extremadamente secos del sur de

a)

b)

c)

d)

FIGURA 21-8 Gimnospermas

a) Este ginkgo, o árbol del cabello de Venus, es hembra y tiene semillas carnosas del tamaño de cerezas grandes. ***b)*** Una cicadácea. Estas plantas fueron comunes en la era de los dinosaurios, pero en la actualidad sólo existen unas 160 especies. Al igual que los ginkgos, las cicadáceas tienen diferentes sexos. ***c)*** Las hojas de la gnetofita Welwitschia pueden tener cientos de años. ***d)*** Las hojas en forma de aguja de las coníferas están protegidas por una capa superficial de cera.

África, tiene una raíz primaria que alcanza profundidades de hasta 30 metros por debajo del nivel del suelo. Sobre la superficie, la planta tiene un tallo fibroso. Dos (y sólo dos) hojas crecen a partir del tallo y jamás son sustituidas por otras, sino que permanecen en la planta durante toda la vida de ésta, que puede llegar a ser muy larga. La *Welwitschia* más antigua tiene más de 2000 años, y el ciclo vital típico de uno de estos ejemplares dura unos 1000 años. Las hojas en forma de tira continúan creciendo durante todo ese tiempo, por lo que se extienden profusamente sobre el suelo. Las porciones más antiguas de las hojas, azotadas por el viento durante siglos, a menudo se rompen, lo que confiere a la planta su característica apariencia retorcida y raída.

Las coníferas están adaptadas a climas fríos

Aunque los otros *fila* de las gimnospermas han reducido drásticamente su prominencia de otros tiempos, las **coníferas** aún dominan vastas zonas de nuestro planeta. Las coníferas, que incluyen los pinos, los abetos, las píceas, las cicutas y los cipreses, son más abundantes en las frías latitudes septentrionales y a grandes alturas, donde las condiciones son de clima seco. En estas regiones la lluvia es escasa y, además, el agua del suelo permanece congelada y no se encuentra disponible durante los largos inviernos.

Las coníferas se han adaptado a condiciones de frío y sequedad de diversas formas. En primer lugar, las coníferas conservan sus hojas verdes durante todo el año, lo que les permite continuar fotosintetizando y creciendo lentamente en épocas en que casi todas las demás plantas se aletargan. Por esta razón, suele describirse a las coníferas como plantas perennifolias. En segundo lugar, las hojas de las coníferas son en realidad agujas delgadas cubiertas con una cutícula gruesa cuya reducida superficie impermeable reduce al mínimo la evaporación (**FIGURA 21-8d**). Por último, la savia de las coníferas contiene un "anticongelante" que les permite continuar transportando nutrimentos a temperaturas por debajo del punto de congelación. Esta sustancia les confiere su fragante aroma "a pino".

Las semillas de las coníferas se desarrollan en conos

La reproducción es similar en todas las coníferas, así que examinaremos el ciclo reproductivo del pino (**FIGURA 21-9**). El árbol mismo es el esporofito diploide, en el que se desarrollan conos tanto masculinos como femeninos. Los conos masculinos son relativamente pequeños (normalmente de unos dos centímetros o menos) y de estructura delicada; durante la temporada reproductiva liberan nubes de polen y luego se desintegran. Estas nubes de polen son inmensas; inevitablemen-

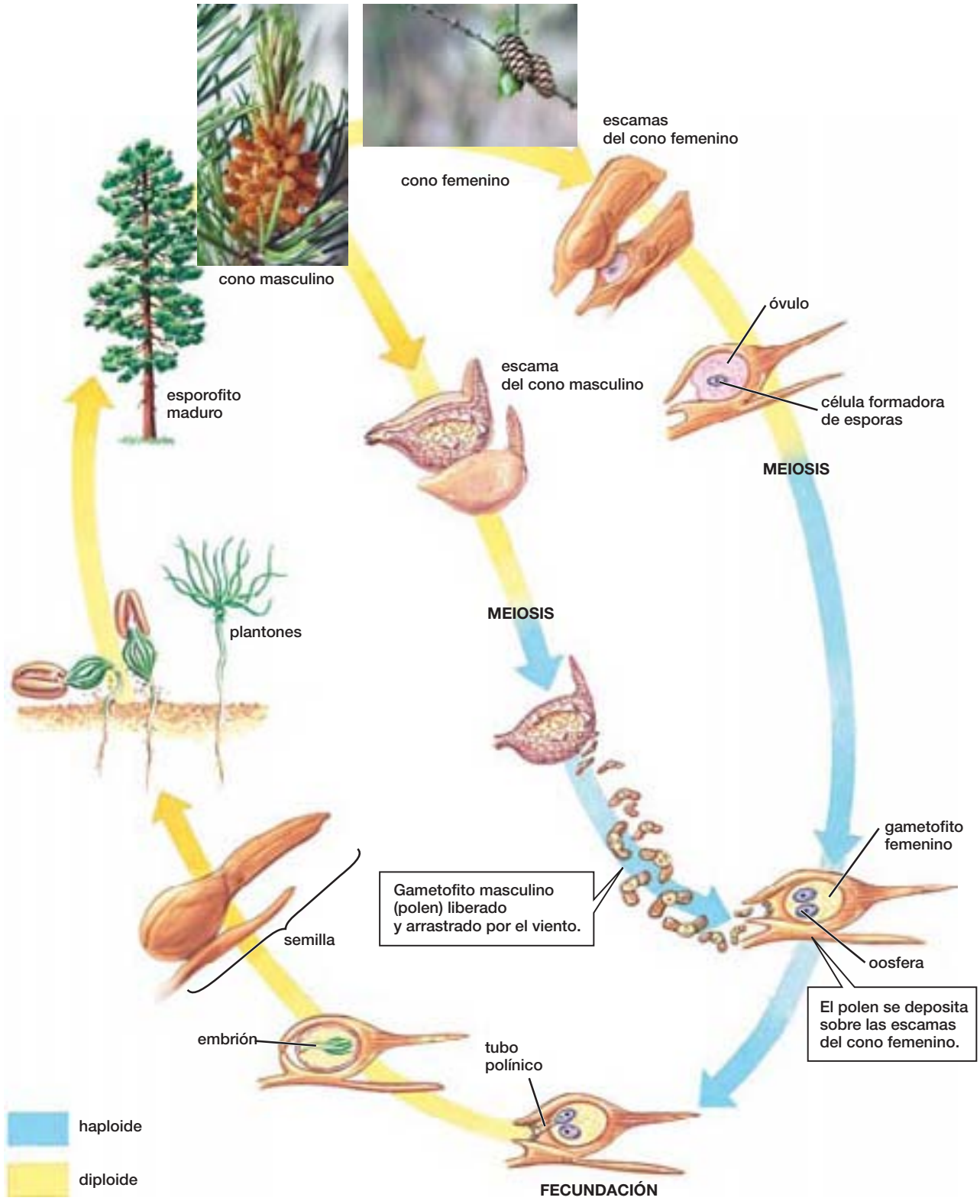


FIGURA 21-9 **Ciclo vital del pino**

El pino es la generación esporofítica (arriba a la izquierda) que posee conos tanto masculinos como femeninos. Los gametofitos haploides femeninos se desarrollan dentro de las escamas de los conos femeninos y producen oosferas. Los conos masculinos producen polen, es decir, gametofitos masculinos. Un grano de polen, dispersado por el viento, se deposita en las escamas de un cono femenino. Del grano de polen crece un tubo polínico que penetra en el gametofito femenino y conduce los espermatozoides hacia la oosfera. La oosfera fecundada se transforma en una planta embrionaria encerrada en una semilla. Finalmente, la semilla se desprende del cono, germina y crece hasta convertirse en un árbol esporofítico.

te, algunos granos de polen se depositan de manera fortuita sobre un cono femenino.

Cada cono femenino consiste en una serie de escamas leñosas dispuestas en espiral en torno a un eje central. En la base de cada escama hay dos **óvulos** (semillas inmaduras), en cuyo interior se forman células esporíferas diploides que experimentan meiosis para formar gametofitos femeninos haploides. Estos gametofitos se desarrollan y producen oosferas. Si un grano de polen proveniente de un cono masculino cae en las cercanías, envía un tubo polínico que se introduce poco a poco en el gametofito femenino. Al cabo de casi 14 meses, el tubo alcanza finalmente la oosfera y libera al espermatozoide que la fecunda. La oosfera fecundada queda encerrada en una semilla a medida que se desarrolla hasta formar una pequeñísima planta embrionaria. La semilla queda en libertad cuando el cono madura y sus escamas se separan.

Las angiospermas son plantas con semilla que dan flores

Las plantas con flor modernas, o **angiospermas**

FIGURA 21-10a) hasta el imponente árbol de eucalipto (**FIGURA 21-10b**), de más de 100 metros de altura. Desde el cactus del desierto hasta las orquídeas tropicales, los pastos y el muérdago parásito, las angiospermas dominan el reino vegetal.

Las flores atraen a los polinizadores

Tres adaptaciones principales han contribuido al enorme éxito de las angiospermas: las flores, los frutos y las hojas anchas. Las **flores**, que son las estructuras en donde se forman los gametofitos tanto masculinos como femeninos, tal vez surgieron cuando una gimnosperma ancestral formó una asociación con animales (probablemente insectos) que transportaban su polen de una planta a otra. Según esta hipótesis, la relación entre estas antiguas gimnospermas y sus polinizadores animales fue tan provechosa, que la selección natural favoreció la evolución de vistosas flores que anunciaban la presencia de polen a los insectos y otros animales (**FIGURA 21-10b, e**). Los animales se beneficiaban al comer parte del polen, rico en proteína, en tanto que las plantas se beneficiaban del transporte involuntario de polen de una a otra por parte de los animales. Con esta ayuda, las plantas con flor ya no necesitaban producir cantidades enormes de polen y depender de los caprichosos vientos para asegurar la fecundación. Sin embargo, también existen muchas angiospermas que se polinizan a través del viento (**FIGURA 21-10c, d**).

En el ciclo vital de las angiospermas (**FIGURA 21-11**), las flores se desarrollan en la planta esporofítica dominante. Los gametofitos masculinos (polen) se forman en el interior de una estructura denominada *antera;* el gametofito femenino se desarrolla a partir de un óvulo, dentro de la parte de la flor conocida como *ovario.* La oosfera, por su parte, se desarrolla en el interior del gametofito femenino. Se produce la fecundación cuando el polen forma un tubo a través del *estigma,* una estructura pegajosa de la flor que atrapa el polen, y perfora para alcanzar el interior del óvulo, donde el cigoto se desarrolla hasta convertirse en un embrión encerrado en una semilla que se forma a partir del óvulo.

Los frutos propician la dispersión de las semillas

El ovario, que envuelve a la semilla de una angiosperma, madura hasta transformarse en un **fruto**, la segunda adaptación que ha contribuido al éxito de estas plantas. Así como las flores atraen a los animales para que transporten polen, también muchos frutos los tientan para que dispersen las semillas. Si un animal come un fruto, muchas de las semillas que éste contiene recorren el tubo digestivo del animal sin sufrir daño, para después caer, con suerte, en un lugar idóneo para su germinación. Sin embargo, no todos los frutos dependen de su carácter comestible para dispersarse. Como bien lo saben los dueños de perros, por ejemplo, ciertos frutos, llamados *abrojos,* se dispersan aferrándose al pelaje de los animales. Otros, como los frutos de los arces, por ejemplo, desarrollan alas que transportan la semilla por el aire. La variedad de mecanismos de dispersión que han desarrollado los diversos frutos ayuda a las angiospermas a invadir prácticamente todos los hábitat terrestres posibles.

Las hojas anchas captan más luz solar

Una tercera característica que confiere a las angiospermas una ventaja adaptativa en climas más cálidos y húmedos la constituyen las hojas anchas. Cuando hay agua en abundancia, como ocurre durante la temporada calurosa de crecimiento en los climas templados y tropicales, las hojas anchas representan una ventaja porque captan más luz solar para la fotosíntesis. En regiones donde las condiciones de crecimiento varían con las estaciones, muchos árboles y arbustos pierden sus hojas durante los periodos de escasez de agua porque así se reduce la pérdida de ésta por evaporación. En los climas templados estos periodos se presentan en otoño e invierno, época en que prácticamente todos los árboles y arbustos angiospermos de estos climas pierden sus hojas. En las regiones tropicales y subtropicales casi todas las angiospermas son perennifolias, pero las especies que habitan en ciertos climas tropicales, donde es común que haya periodos de sequía, pueden perder sus hojas para conservar el agua durante la estación seca.

Las ventajas de las hojas anchas tienen ciertos costos evolutivos. En particular, las hojas tiernas y anchas son mucho más atractivas para los herbívoros que las agujas duras y céreas de las coníferas. En consecuencia, las angiospermas han creado diversas defensas contra los mamíferos e insectos herbívoros. Estas adaptaciones incluyen defensas físicas como pinchos, espinas y resinas que endurecen las hojas. Pero la lucha evolutiva por la supervivencia también ha dado origen a una multitud de defensas químicas, esto es, compuestos que hacen a la planta tóxica o desagradable para los depredadores potenciales. Muchos de los compuestos que constituyen la defensa química tienen propiedades que los seres humanos hemos explotado con fines medicinales y culinarios. Medicamentos como la aspirina y la codeína, estimulantes como la nicotina y la cafeína, y condimentos como la mostaza y la menta, provienen de plantas angiospermas.

Las plantas que evolucionaron más recientemente tienen gametofitos más pequeños

La historia evolutiva de las plantas ha estado marcada por la tendencia de que la generación esporofítica se vuelva cada vez más prominente y la longevidad y el tamaño de la genera-

a)

b)

c)

d)

e)

FIGURA 21-10 Angiospermas

a) La angiosperma más pequeña es la lenteja de agua que flota en los estanques. Estos especímenes miden alrededor de 3 milímetros de diámetro. ***b)*** Las angiospermas más grandes son los eucaliptos, que alcanzan hasta más de 100 metros de altura. Tanto ***c)*** los pastos como muchos árboles, por ejemplo, ***d)*** este abedul, cuyas flores se muestran como botones (verdes) y en floración (marrón) tienen flores que pasan desapercibidas y dependen del viento para la polinización. Las flores, como las de ***e)*** esta hierba de la mariposa y del eucalipto (**imagen en recuadro de la parte b**), atraen insectos y otros animales que transportan polen entre las plantas individuales. EJERCICIO: Elabora una lista de las ventajas y desventajas de la polinización a través del viento. Haz lo mismo para la polinización por medio de animales. ¿Por qué ambos tipos de polinización persisten entre las angiospermas?

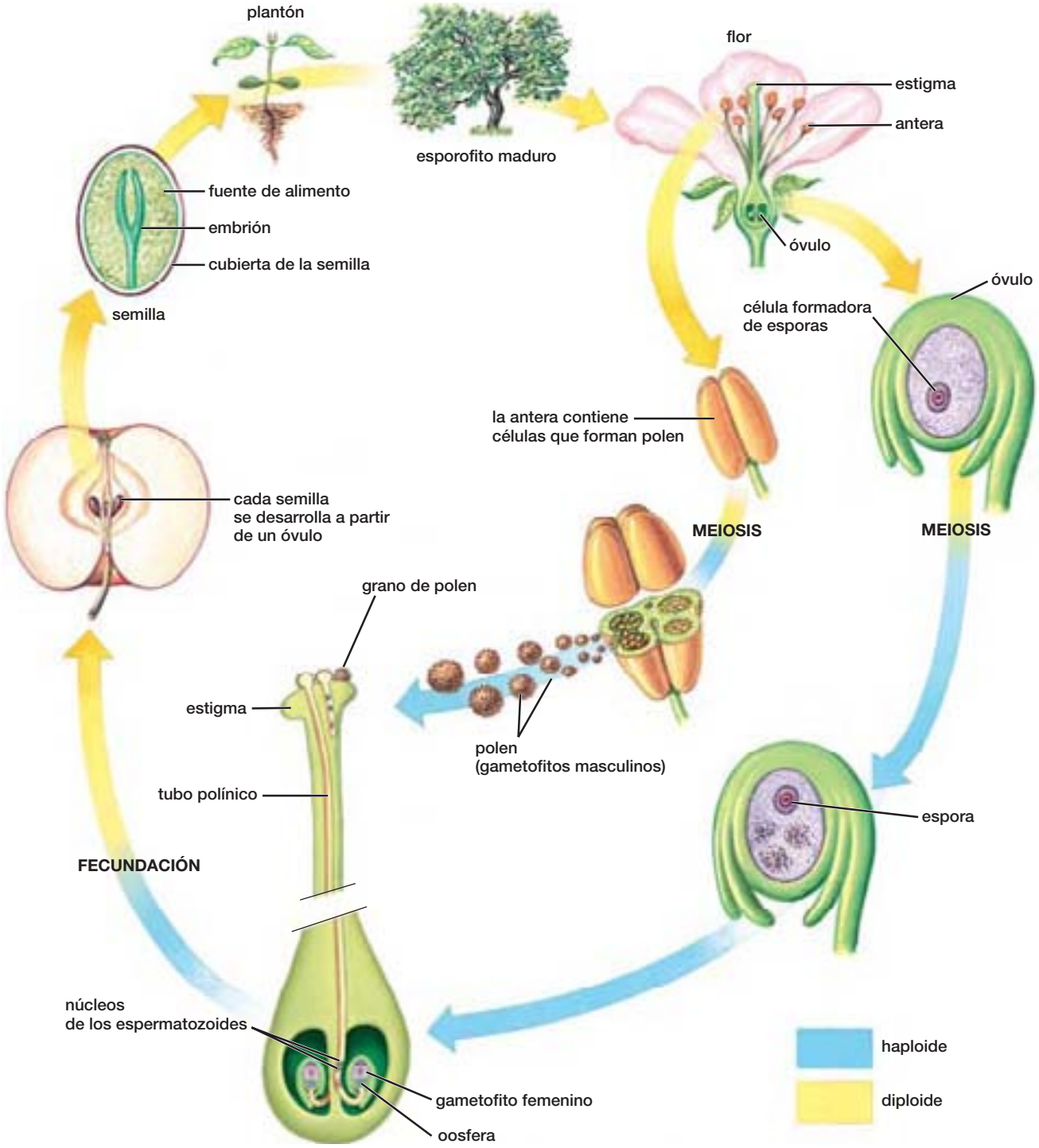


FIGURA 21-11 Ciclo vital de una planta con flor
El cuerpo de la planta dominante (arriba a la derecha) es el esporofito diploide, cuyas flores producen normalmente gametofitos tanto masculinos como femeninos. Los gametofitos masculinos (granos de polen) se producen dentro de las anteras. El gametofito femenino se desarrolla a partir de una espora en el interior del óvulo y contiene una oosfera. Un grano de polen que cae dentro de un estigma forma un tubo polínico que baja hacia el óvulo y llega al gametofito femenino. Ahí libera sus espermatozoides, uno de los cuales se une con la oosfera para formar un cigoto. El óvulo da origen a la semilla, que contiene el embrión en desarrollo y constituye su fuente de alimento. La semilla se dispersa, germina y se desarrolla hasta convertirse en un esporofito maduro.

ción gametofítica se reduzcan (véase la tabla 21-1). Por eso se cree que las primeras plantas eran similares a las plantas no vasculares de la actualidad, las cuales tienen un esporofito más pequeño en comparación con el gametofito y que permanece unido a éste. En contraste, las plantas que se originaron tiempo después, como los helechos y otras plantas vasculares sin semilla, desarrollaron un ciclo de vida en el que el esporofito es dominante y el gametofito es una planta independiente y de menor tamaño. Por último, en el grupo de plantas que se originó más recientemente, las plantas con semilla, los gametofitos son microscópicos y apenas reconocibles como una generación alterna. Sin embargo, estos diminutos gametofitos aún producen oosferas y espermatozoides que se unen para formar el cigoto, el cual se desarrolla hasta formar un esporofito diploide.

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO LA REINA DE LOS PARÁSITOS

Las aproximadamente 17 especies de plantas parásitas del género *Rafflesia*, que incluyen la *Rafflesia arnoldii*, habitan en los bosques húmedos del sureste asiático, un hábitat que está desapareciendo rápidamente conforme se talan las selvas para ceder paso a la agricultura y el desarrollo económico. La zona geográfica donde crece la *Rafflesia arnoldii* está limitada a las reducidas selvas de la península de Malasia y las islas de Borneo y Sumatra, en Indonesia; la especie es escasa y está en peligro de extinción. El gobierno de Indonesia ha establecido algunos parques y reservas para proteger a la *Rafflesia arnoldii*, pero, como sucede con frecuencia en los países en desarrollo, un bosque o una selva protegida en el papel es vulnerable en la realidad. Tal vez la mayor esperanza para la supervivencia de la *Rafflesia* de mayor tamaño sea la toma de conciencia por parte de los residentes rurales de Sumatra y Borneo de que las espectaculares flores de olor pútrido atraen a turistas interesados. En el marco de un innovador programa de conservación, que pretende aprovechar su potencial para el ecoturismo, los pobladores que viven cerca de las *Rafflesia arnoldii* se han convertido en los mejores cuidadores de esas plantas. A cambio de cuidar estas plantas, pueden cobrar una módica tarifa a los curiosos visitantes. Los pobladores reciben un incentivo económico para proteger esta extraña planta parasitaria.

Piensa en esto Un estilo de vida parasitario es inusual entre las plantas, pero es una modalidad que, de hecho, se presenta. Quince familias diferentes de plantas incluyen especies parasitarias, y los sistemáticos estiman que el parasitismo ha evolucionado por lo menos en nueve ocasiones a lo largo de la historia evolutiva de las plantas. ¿Por qué a pesar de los obvios beneficios de la fotosíntesis, el parasitismo (que a menudo va acompañado de una pérdida de la capacidad fotosintética) evolucionó repetidamente en las plantas que realizan fotosíntesis?

REPASO DEL CAPÍTULO

RESUMEN DE CONCEPTOS CLAVE

21.1 ¿Cuáles son las principales características de las plantas?
El reino Plantae se compone de organismos eucarióticos multicelulares fotosintéticos. A diferencia de sus parientes, las algas verdes, las plantas desarrollan embriones multicelulares y dependientes y presentan una alternancia de generaciones, en la que una generación gametofítica haploide se alterna con una generación esporofítica diploide. Las plantas desempeñan un papel ecológico clave, al captar energía y ponerla a disposición de los habitantes de los ecosistemas terrestres, reabasteciendo el oxígeno atmosférico y creando y estabilizando los suelos.

21.2 ¿Cuál es el origen evolutivo de las plantas?
Protistas fotosintéticos, probablemente algas verdes, dieron origen a las primeras plantas. Las plantas primitivas eran probablemente semejantes a las algas verdes multicelulares modernas, que tienen pigmentos fotosintéticos, moléculas de almidón y componentes de pared celular similares a los de las plantas, incluida la celulosa. La vida en aguas dulces de las algas verdes pudo haberlas dotado de cualidades que permitieron a sus descendientes invadir la tierra.

21.3 ¿Cómo se adaptaron las plantas a la vida en la tierra?
Las plantas también presentan diversas adaptaciones a la vida terrestre: raíces para anclarse a tierra y que les permiten absorber agua y nutrimentos; una cutícula cerosa para reducir la pérdida de agua a través de la evaporación; estomas que permiten el intercambio gaseoso cuando se abren y que evitan la pérdida de agua al cerrarse; vasos conductores para transportar agua y nutrimentos por toda la planta, y una sustancia endurecedora, llamada lignina, para impregnar los vasos y brindar soporte al cuerpo de la planta.

Las estructuras reproductoras de las plantas que viven en tierra incluyen un gametofito masculino reducido (el polen), el cual permite que el viento tome el lugar del agua para transportar los espermatozoides hacia las oosferas; semillas que nutren, protegen y ayudan a dispersar los embriones en desarrollo; flores que atraen a los animales, los cuales se encargan de transportar el polen de manera más precisa y eficiente que el viento, y los frutos, que tientan a los animales para dispersar las semillas.

Web tutorial 21.1 Adaptaciones en la evolución de las plantas

21.4 ¿Cuáles son los principales grupos de plantas?
De las primitivas algas ancestrales surgieron dos grupos principales de plantas: las briofitas y las plantas vasculares. Las briofitas, que incluyen las hepáticas y los musgos, son plantas terrestres pequeñas y simples que carecen de vasos conductores. Aunque algunas se han adaptado a regiones secas, la mayoría vive en ambientes húmedos. Para reproducirse, las briofitas necesitan agua en la que puedan nadar los espermatozoides para alcanzar la oosfera.

En las plantas vasculares, un sistema de vasos, que debe su rigidez a la lignina, conduce el agua y los nutrimentos absorbidos por las raíces hasta las partes superiores de la planta, además de sostener su cuerpo. Gracias a este sistema de sostén, las plantas vasculares sin semilla, que comprenden los licopodios, las colas de caballo y los helechos, crecen hasta alcanzar mayores dimensiones que las briofitas. Al igual que en estas últimas, los espermatozoides de las plantas vasculares sin semilla deben nadar hasta la oosfera para llevar a cabo la reproducción sexual, y el gametofito carece de vasos conductores.

Las plantas vasculares con semilla presentan otras dos características adaptativas importantes: el polen y las semillas. Las plantas con semilla se clasifican en dos categorías: gimnospermas y angiospermas. Las primeras comprenden los ginkgos, las cicadáceas, las gnetofitas y las coníferas, estas últimas de gran éxito. Todas ellas fueron las primeras plantas terrestres producto de la evolución. Su éxito en tierra seca se debe en parte a la transformación evolutiva del gametofito masculino en el grano de polen. El polen protege y transporta el gameto masculino, con lo que se elimina la necesidad de que el espermatozoide nade hasta la oosfera. La semilla, una estructura protectora latente que contiene un embrión y una provisión de alimento, es una segunda adaptación importante que contribuye al éxito de las plantas con semilla.

Actualmente, las angiospermas, esto es, las plantas con flores, predominan en gran parte del medio terrestre. Además del polen y las semillas, las angiospermas también producen flores y frutos. La flor permite a las angiospermas valerse de los animales como polinizadores. En contraste con el viento, en ciertos casos, los animales transportan el polen más lejos y con mayor precisión y menos desperdicio. Los frutos atraen a consumidores animales, que accidentalmente dispersan las semillas en sus heces.

En general, la tendencia evolutiva es hacia la reducción del gametofito haploide, que es dominante en las briofitas, pero microscópico en las plantas con semilla.

Web tutorial 21.2 Ciclo de vida de un helecho

TÉRMINOS CLAVE

alternancia de generaciones *pág. 404*
angiosperma *pág. 416*
anteridio *pág. 408*
arquegonio *pág. 408*
briofita *pág. 407*
cigoto *pág. 404*
conífera *pág. 414*
cutícula *pág. 406*
esporofito *pág. 404*
estomas *pág. 406*
flor *pág. 416*
fruto *pág. 416*
gametofito *pág. 404*
gimnosperma *pág. 410*
lignina *pág. 406*
óvulo *pág. 416*
polen *pág. 410*
semilla *pág. 410*
vascular *pág. 407*
vaso *pág. 410*

RAZONAMIENTO DE CONCEPTOS

¿Qué significa la expresión "alternancia de generaciones"? ¿De cuáles dos generaciones se trata? ¿Cómo se reproduce cada una de ellas?

Explica los cambios evolutivos en la reproducción de las plantas que les permitieron adaptarse a ambientes cada vez más secos.

Describe las tendencias evolutivas de los ciclos vitales de las plantas. Pon especial énfasis en el tamaño relativo del gametofito y el esporofito.

¿De qué grupo de algas surgieron probablemente las plantas verdes? Explica las evidencias que respaldan esta hipótesis.

Menciona las adaptaciones estructurales que fueron necesarias para que las plantas invadieran la tierra seca. ¿Con cuáles de estas adaptaciones cuentan las briofitas? ¿Y los helechos? ¿Y las gimnospermas y angiospermas?

6. El número de especies de plantas con flor es mayor que el número de especies del resto del reino vegetal. ¿A qué características se debe el enorme éxito de las angiospermas? Explica por qué.
7. Menciona las adaptaciones de las gimnospermas que les han ayudado a llegar a convertirse en los árboles predominantes en los climas fríos y secos.
8. ¿Qué es un grano de polen? ¿Cómo ha ayudado a las plantas a colonizar la tierra seca?
9. La mayoría de las plantas tienen semilla. ¿Qué ventaja ofrece la semilla? ¿Cómo satisfacen las plantas sin semillas las necesidades que cubren estas últimas?

APLICACIÓN DE CONCEPTOS

1. Supongamos que eres un genetista que trabaja para una empresa especializada en biotecnología vegetal. Describe qué partes *específicas* (frutos, semillas, tallos, raíces, etcétera) de las siguientes plantas intentarías alterar mediante ingeniería genética, qué cambios tratarías de hacer y por qué: ***a)*** el maíz, ***b)*** los tomates, ***c)*** el trigo y ***d)*** los aguacates.
2. Antes de la creación de fármacos sintéticos, más del 80 por ciento de todos los medicamentos eran de origen vegetal. Aún en la actualidad, las tribus indígenas de las remotas selvas tropicales amazónicas son capaces de recomendar al menos un producto vegetal para tratar prácticamente cualquier padecimiento. También en China se practica extensamente y con gran éxito la medicina herbolaria. La mayoría de estos fármacos son desconocidos en el mundo occidental. Pero los bosques de los que se obtiene gran parte de este material vegetal están siendo talados para destinar las tierras a la agricultura. Estamos en peligro de perder muchos de estos posibles fármacos antes de descubrirlos siquiera. ¿Qué medidas sugerirías para conservar estos recursos naturales, sin impedir al mismo tiempo a los países dirigir su propio desarrollo económico?
3. Sólo unos pocos centenares de los cientos de miles de especies del reino vegetal se han domesticado para uso humano. Un ejemplo es la almendra. La almendra doméstica es nutritiva e inocua; en cambio, su precursora silvestre produce intoxicación por cianuro. El roble elabora semillas (bellotas) potencialmente nutritivas que contienen taninos de sabor muy amargo. Si pudiéramos eliminar por cultivo los taninos de las bellotas, éstas podrían llegar a ser un manjar. ¿A qué crees que se deba el hecho de que no hayamos conseguido domesticar los robles?

PARA MAYOR INFORMACIÓN

Diamond, J. "How to Tame a Wild Plant". *Discover*, septiembre de 1994. Las plantas cultivadas tienen propiedades ecológicas y genéticas que las hacen apropiadas para la agricultura.

Joyce, C. *Earthly Goods: Medicine-Hunting in the Rainforest.* Boston: Little, Brown, 1994. La ciencia y la aventura se combinan en este relato acerca de la búsqueda de nuevos medicamentos y sobre las personas que se dan a esa tarea.

Kaufman, P. B. *Plants their Biology and Importance.* Nueva York: Harper & Row, 1989. Una cobertura completa y de fácil lectura sobre diversos aspectos de la taxonomía, fisiología y evolución de las plantas.

McClintock, J. "The Life, Death, and Life of a Tree". *Discover*, mayo de 2002. El autor describe la biología de las majestuosas secuoyas de California y la amenaza que enfrentan por la codicia de la humanidad.

Milot, V. "Blueprint for Conserving Plant Diversity". *BioScience*, junio de 1989. Señala la importancia de preservar la diversidad genética en las especies de plantas en peligro de extinción.

Pollan, M. *The Botany of Desire*. Nueva York: Random House, 2001. Un libro muy bien escrito sobre la relación de beneficio mutuo entre los humanos y las plantas.

Russel, S. A. *Anatomy of a Rose: Exploring the Secret Life of Flowers.* Nueva York, 2001. Una exploración elegante y bellamente narrada de la biología y la influencia de las flores en los seres humanos.

CAPÍTULO

22 La diversidad de los hongos

Estos *Armillaria* color miel forman parte de las porciones visibles de los organismos más grandes del mundo.

DE UN VISTAZO

ESTUDIO DE CASO: Hongos descomunales

22.1 ¿Cuáles son las principales características de los hongos?

El cuerpo de los hongos se compone de filamentos
Los hongos obtienen sus nutrimentos de otros organismos
Los hongos se propagan a través de esporas
La mayoría de los hongos se pueden reproducir tanto sexual como asexualmente

22.2 ¿Cuáles son los principales tipos de hongos?

Los quitridiomicetos producen esporas natatorias
Los cigomicetos se reproducen formando esporas diploides
Los ascomicetos forman esporas en una funda semejante a un saco
Los basidiomicetos producen estructuras reproductoras con forma de clava

22.3 ¿De qué manera interactúan los hongos con otras especies?

Los líquenes se componen de hongos que viven con algas o bacterias fotosintéticas
Las micorrizas son hongos asociados con las raíces de plantas
Los endófitos son hongos que viven dentro de los tallos y las hojas de las plantas
Algunos hongos son recicladores importantes

22.4 ¿Cómo afectan los hongos a los seres humanos?

Los hongos atacan plantas que son importantes para las personas
Los hongos producen enfermedades humanas
Los hongos pueden producir toxinas
Muchos antibióticos se derivan de los hongos

Guardián de la Tierra: El caso de las setas que desaparecen
Los hongos hacen importantes aportaciones a la gastronomía

Conexiones evolutivas: El ingenio de los hongos: Cerdos, escopetas y lazos

Enlaces con la vida: Recolecta con cuidado

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO
Hongos descomunales

ESTUDIO DE CASO: HONGOS DESCOMUNALES

¿CUÁL ES EL ORGANISMO más grande sobre la Tierra? Una suposición razonable sería que se trata de la ballena azul, que llega a medir más de 30 metros de largo y a pesar 135 toneladas. Sin embargo, la ballena azul parecería pequeña comparada con el árbol General Sherman, un espécimen de secoya gigante que mide 84 metros de altura y pesa aproximadamente 6200 toneladas. Pero incluso esos dos gigantes se vuelven insignificantes junto al verdadero poseedor del récord: el hongo *Armillaria ostoyae*, también conocido como Armillaria color miel, cuyo espécimen más grande, localizado en Oregon, se extiende sobre una superficie de 9 kilómetros cuadrados (aproximadamente 3.4 millas cuadradas) y quizá pese más, incluso, que el General Sherman. A pesar de su enorme tamaño, en realidad nadie ha visto este descomunal hongo, porque la mayor parte de su cuerpo se encuentra bajo la tierra. Sus partes sobre la tierra son únicamente hongos amarillentos que brotan ocasionalmente a partir de su gigantesco cuerpo. No obstante, debajo de la superficie, el hongo se extiende a través del suelo mediante grandes estructuras filamentosas llamadas rizomorfos, los cuales se extienden hasta que encuentran las raíces del árbol sobre el cual subsiste el *Armillaria*, originando así la putrefacción de las raíces que debilitan o matan el árbol. Este proceso ofrece evidencia sobre la superficie de la existencia del *Armillaria*: el enorme espécimen de Oregon fue identificado primero por fotografías de inspección aérea para encontrar zonas boscosas donde hubiera muchos árboles muertos.

¿Cómo pueden saber los investigadores que el hongo de Oregon es realmente un solo individuo y no muchos entrelazados? Las pruebas más sólidas son de índole genética. Los investigadores recopilaron muestras de tejido del *Armillaria* en toda el área donde se creía que habitaba un solo individuo y se comparó el DNA extraído de las muestras. Todas éstas resultaron genéticamente idénticas, lo cual demostró que provenían del mismo individuo.

Quizá suene extraño que el organismo más grande del mundo hubiera pasado inadvertido hasta hace muy poco tiempo; sin embargo, por lo general la vida de los hongos se desarrolla fuera del alcance de nuestros ojos. No obstante, los hongos juegan un papel fascinante en la existencia humana. Sigue leyendo para averiguar más acerca de los poco visibles pero a menudo influyentes miembros del reino Fungi.

22.1 ¿CUÁLES SON LAS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS HONGOS?

Cuando se piensa en hongos, lo más probable es que nos vengan a la mente los champiñones o las setas. Sin embargo, la mayoría de los hongos no producen setas ni champiñones, e incluso los hongos que sí los producen, los champiñones y las setas son sólo estructuras reproductivas temporales que se extienden a partir del cuerpo principal que, por lo general, queda oculto debajo del suelo o dentro de un trozo de madera en descomposición. Así, para apreciar cabalmente el reino Fungi, debemos recurrir a los micólogos —los científicos que estudian los hongos— y ver más allá de las peculiares estructuras que encontramos en el suelo de los bosques, a la orilla de las zonas con césped o en una suculenta pizza. Un minucioso examen a los hongos revela un grupo de organismos principalmente multicelulares que juegan un papel fundamental en la urdimbre de la vida y cuyas formas de vida difieren de manera fascinante de las de plantas y animales.

El cuerpo de los hongos se compone de filamentos

El cuerpo de casi todos los hongos es un **micelio** (FIGURA 22-1a), que es una masa entretejida de filamentos de una célula de espesor, parecidos a hilos, llamados **hifas** (FIGURA 22-1b, c). Según la especie de que se trate, las hifas consisten en células individuales alargadas con diversos núcleos, o bien, están subdivididas por tabiques llamados **septos** en muchas células, cada una de las cuales tiene uno o varios núcleos. Los septos tienen poros que permiten el flujo de citoplasma entre las células para distribuir los nutrimentos. Al igual que las células vegetales, las células micóticas están envueltas en paredes celulares. A diferencia de aquéllas, sin embargo, las paredes celulares micóticas están reforzadas con *quitina*, la misma sustancia que está presente en el exoesqueleto de los artrópodos.

Los hongos no pueden desplazarse; aunque compensan la falta de movilidad con canutillos capaces de crecer rápidamente en cualquier dirección dentro de un medio idóneo. El micelio de los hongos penetra rápidamente en el pan viejo o en el queso, debajo de la corteza de los troncos en descomposición o en el suelo. Periódicamente, las hifas crecen juntas y se diferencian para formar estructuras reproductoras que se proyectan por encima de la superficie bajo la cual crece el micelio. Tales estructuras, que incluyen las setas, los bejines y los mohos polvosos de los alimentos no refrigerados representan únicamente una fracción del cuerpo completo de los hongos pero, por lo general, son la única parte del hongo que vemos con facilidad.

Los hongos obtienen sus nutrimentos de otros organismos

Al igual que los animales, los hongos sobreviven degradando nutrimentos almacenados en el cuerpo o en los desechos de otros organismos. Algunos hongos digieren el cuerpo de organismos muertos. Otros son parásitos que se alimentan a costa de organismos vivos y producen enfermedades. Otros más viven en relación mutuamente benéfica con otros organismos que les brindan alimento. Hay incluso algunos hongos depredadores que atacan a gusanos diminutos del suelo.

A diferencia de los animales, los hongos no ingieren alimento. En cambio, secretan enzimas que digieren moléculas complejas fuera de su cuerpo, y las descomponen en subunidades más pequeñas susceptibles de ser absorbidas. Los filamentos de los hongos pueden penetrar profundamente en una fuente de nutrimentos y son del grosor de una célula, por lo que tienen una área superficial enorme, a través de la cual secretan enzimas y absorben nutrimentos. Este método para obtener nutrimentos ha dado buenos servicios a los hongos. Casi cualquier material biológico puede ser consumido por al menos una especie de hongos, por lo que es muy probable que los hongos encuentren sustento nutritivo en casi cualquier hábitat terrestre.

Los hongos se propagan a través de esporas

A diferencia de las plantas y los animales, los hongos no forman embriones. En cambio, los hongos se reproducen me-

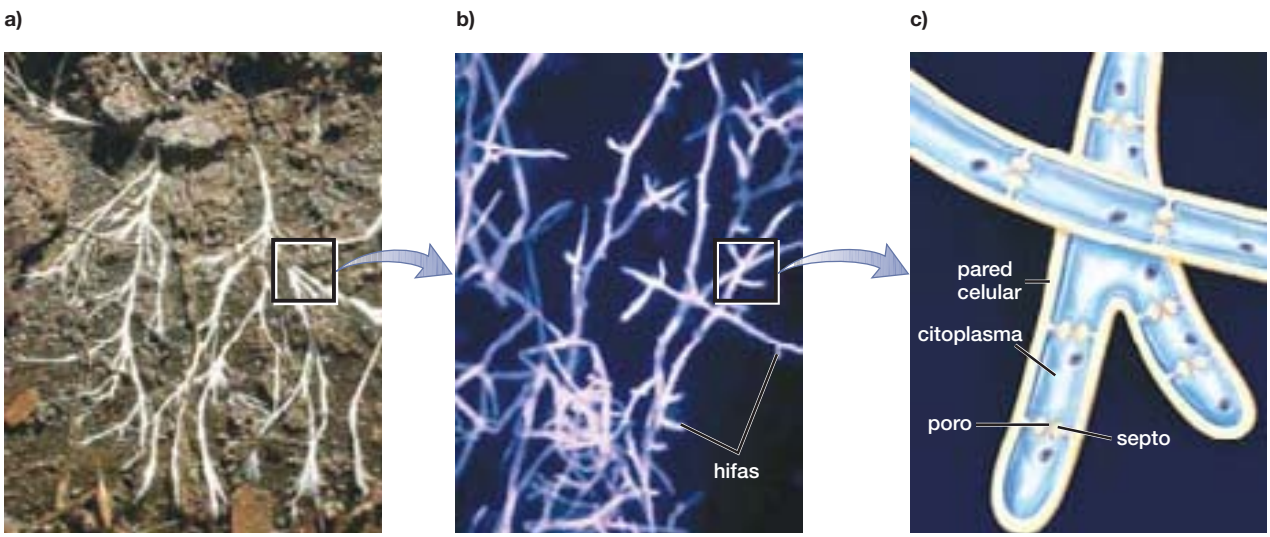


FIGURA 22-1 El cuerpo filamentoso de un hongo

Un micelio de hongo se extiende sobre vegetación en descomposición. El micelio se compone de ***b)*** una maraña de hifas microscópicas, de una sola célula de espesor, que se muestran en sección transversal; ***c)*** aquí se muestra su organización interna. PREGUNTA: ¿Qué características de la estructura corporal de los hongos son adaptaciones relacionadas con esta forma de adquirir nutrimentos?

diante pequeñísimos y ligeros paquetes reproductores llamados **esporas**, que son extraordinariamente móviles, a pesar de que en su mayoría carecen de medios de autopropulsión. Las esporas se distribuyen por todas partes montadas sobre el exterior del cuerpo de los animales, como pasajeros dentro del sistema digestivo de los animales que las ingirieron, o como vagabundos que flotan en el aire a la deriva, lanzadas por el azar o disparadas a la atmósfera mediante complejas estructuras reproductoras (FIGURA 22-2). Asimismo, las esporas suelen producirse en grandes cantidades (un solo bejín gigante puede contener 5 billones de esporas sexuales; véase la figura 22-9a). Los hongos tienen una capacidad reproductora prodigiosa y esporas de gran movilidad, lo que asegura que se encuentren en todos los ambientes terrestres, y explica el inevitable crecimiento de hongos en todo emparedado rezagado y en recipientes de comida sobrante.

La mayoría de los hongos se pueden reproducir tanto sexual como asexualmente

En general, los hongos son capaces de reproducirse tanto asexual como sexualmente. En la mayoría de los casos, la reproducción asexual es la modalidad predeterminada en condiciones estables; en tanto que la reproducción sexual se lleva a cabo principalmente en condiciones de cambio ambiental o de tensión. Por lo común, ambos tipos de reproducción implican la producción de esporas dentro de cuerpos fructíferos especiales que se proyectan por encima del micelio.

La reproducción asexual genera esporas haploides por mitosis

El cuerpo y las esporas de los hongos son haploides (contienen sólo una copia de cada cromosoma). Un micelio haploide produce esporas asexuales haploides por mitosis. Si una espora asexual se deposita en un lugar favorable, comenzará a dividirse mitóticamente y a desarrollarse hasta formar un nuevo micelio. El resultado de este sencillo ciclo reproductivo es la rápida producción de clones genéticamente idénticos al micelio original.

FIGURA 22-2 Algunos hongos expelen esporas
Un hongo estrella de tierra maduro, al ser golpeado por una gota de agua, emite una nube de esporas que se dispersarán en las corrientes de aire.

La reproducción sexual genera esporas haploides por meiosis

Se forman estructuras diploides únicamente durante un breve periodo mientras ocurre la parte sexual del ciclo de vida de los hongos. La reproducción sexual se inicia cuando un filamento de un micelio entra en contacto con un filamento de un segundo micelio, que es de un tipo de cepa diferente y compatible (los diferentes tipos de cepa de los hongos son análogos a los diferentes sexos de los animales, salvo que suele haber más de dos tipos de cepa). Si las condiciones son idóneas, las dos hifas pueden fusionarse, de tal modo que los núcleos de dos hifas distintas compartan una célula común. Esta fusión de hifas va seguida (inmediatamente en algunas especies, al cabo de cierto tiempo en otras) de la fusión de los núcleos haploides diferentes para formar un cigoto diploide. A continuación, el cigoto sufre meiosis para formar esporas sexuales haploides. Tales esporas se dispersan, germinan y se dividen por mitosis para formar nuevos micelios haploides. A diferencia de los descendientes clonados de las esporas asexuales, estos cuerpos micóticos producidos sexualmente son genéticamente distintos de ambos progenitores.

22.2 ¿CUÁLES SON LOS PRINCIPALES TIPOS DE HONGOS?

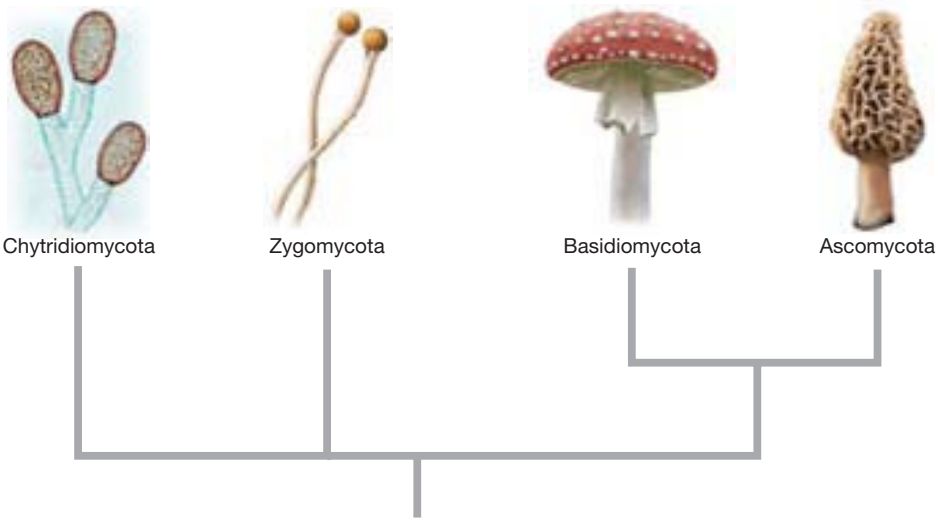
Entre los tres reinos de eucariotas pluricelulares, los hongos y los animales están más estrechamente vinculados entre sí que con las plantas. Es decir, el antepasado común de los hongos y los animales vivió más recientemente que el antepasado común de plantas, animales y hongos (véase la figura 18-6). Una persona que come ensalada de hojas de lechuga con setas está emparentada más cercanamente con la seta de lo que está con la lechuga.

Hay mucha diversidad entre los hongos. Aunque se han descrito cerca de 100,000 especies de hongos, esta cifra representa sólo una fracción de la verdadera diversidad de tales organismos. Cada año se descubren y se describen muchas especies adicionales; los micólogos estiman que el número de especies de hongos que aún no se descubren supera con mucho un millón. Las especies de hongos se clasifican en cuatro *fila*: Chytridiomycota (quitridiomicetos), Zygomycota (cigomicetos), Ascomycota (hongos con saco) y Basidiomycota (hongos de clava) (FIGURA 22-3, tabla 22-1).

Los quitridiomicetos producen esporas natatorias

A diferencia de otros tipos de hongos, casi todos los **quitridiomicetos** viven en el agua. Además, los quitridiomicetos (FIGURA 22-4

FIGURA 22-3 Árbol evolutivo de los principales grupos de hongos



modernos y les dio origen. El registro de fósiles refuerza esta conclusión, pues los hongos fósiles más antiguos conocidos son quitridiomicetos hallados en rocas de más de 600 millones de años de antigüedad. Los hongos ancestrales muy bien pudieron ser similares en sus hábitos a los quitridiomicetos acuáticos y marinos de nuestros días, de manera que los hongos (como las plantas y los animales) probablemente tuvieron su origen en un medio acuoso antes de colonizar la Tierra.

Casi todas las especies de quitridiomicetos se alimentan con plantas acuáticas muertas u otros residuos en ambientes acuosos, pero algunas especies son parásitos de plantas o animales. Se piensa que uno de estos quitridiomicetos parásitos es una causa importante de la actual mortandad mundial de ranas, que amenaza a muchas especies y, al parecer, ya ha provocado la extinción de varias de ellas. Nadie sabe con exactitud por qué surgió esta enfermedad micótica como causa importante de muerte de las ranas. Una hipótesis sugiere que las poblaciones de ranas sometidas a estrés debido a la contaminación y a otros problemas ambientales podrían ser más susceptibles a las infecciones por quitridiomicetos. (Para mayor información acerca de la disminución de ranas, véase la sección "Guardián de la Tierra: Ranas en peligro" del capítulo 24).

Los cigomicetos se reproducen formando esporas diploides

Los **cigomicetos** viven, por lo general, en el suelo o en material vegetal o animal en descomposición. Entre los cigomicetos hay especies que pertenecen al género *Rhizopus*, causantes de las tan conocidas molestias por la pudrición de la fruta y el moho negro del pan. El ciclo de vida del moho negro del pan, que se reproduce tanto asexual como sexualmente, se representa en la **FIGURA 22-5**. La reproducción asexual de los cigomicetos se inicia con la formación de esporas haploides en unas estructuras negras llamadas **esporangios**. Estas esporas se dispersan en el aire y, cuando se depositan en un sustrato idóneo (como un trozo de pan, por ejemplo), germinan para formar nuevas hifas haploides.

Si dos hifas de diferentes tipos de cepa de cigomicetos entran en contacto, puede ocurrir una reproducción sexual.

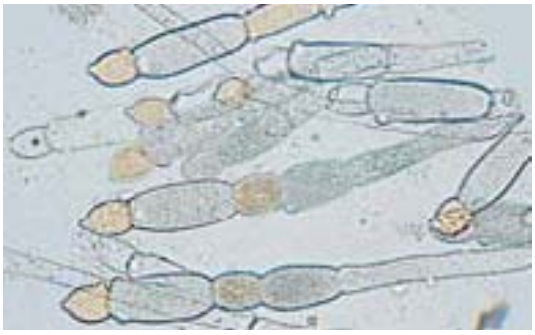


FIGURA 22-4 Filamentos de quítrido
Estos filamentos son del hongo quítrido *Allomyces* que está en plena reproducción sexual. Las estructuras anaranjadas que son visibles en muchos de los filamentos liberan gametos masculinos; las estructuras transparentes liberan gametos femeninos. Los gametos de los quitridiomicetos son flagelados, y estas estructuras reproductoras natatorias contribuyen a la dispersión de los miembros de este filum principalmente acuático.

Tabla 22-1 Principales divisiones de los hongos

Nombre común (filum)	Estructuras reproductoras	Características celulares	Repercusiones en la economía y la salud	Géneros representativos
Quitridiomicetos (Chytridiomycota)	Producen esporas flageladas diploides o haploides	No tienen septos	Contribuyen a la disminución de las poblaciones de ranas	*Batrachochytrium* (hongo patógeno de las ranas)
Cigomicetos (Zygomycota)	Producen cigosporas sexuales diploides	No tienen septos	Causan la pudrición blanda de la fruta y el moho negro del pan	*Rhizopus* (causante del moho negro del pan); *Pilobolus* (hongo del estiércol)
Hongos con saco (Ascomycota)	Forman esporas sexuales en ascas semejantes a sacos	Sí tienen septos	Forman mohos en la fruta; pueden dañar los productos textiles; producen la enfermedad del olmo holandés y la plaga del castaño; incluyen las levaduras y las morillas	*Saccharomyces* (levadura); *Ophiostoma* (causante de la enfermedad del olmo holandés)
Hongos de clava (Basidiomycota)	La reproducción sexual comprende la producción de basidiosporas haploides en basidios con forma de clava	Sí tienen septos	Producen tizones y royas en los cultivos; incluyen algunas setas comestibles	*Amanita* (seta venenosa) mushroom); *Polyporus* (hongo de repisa)

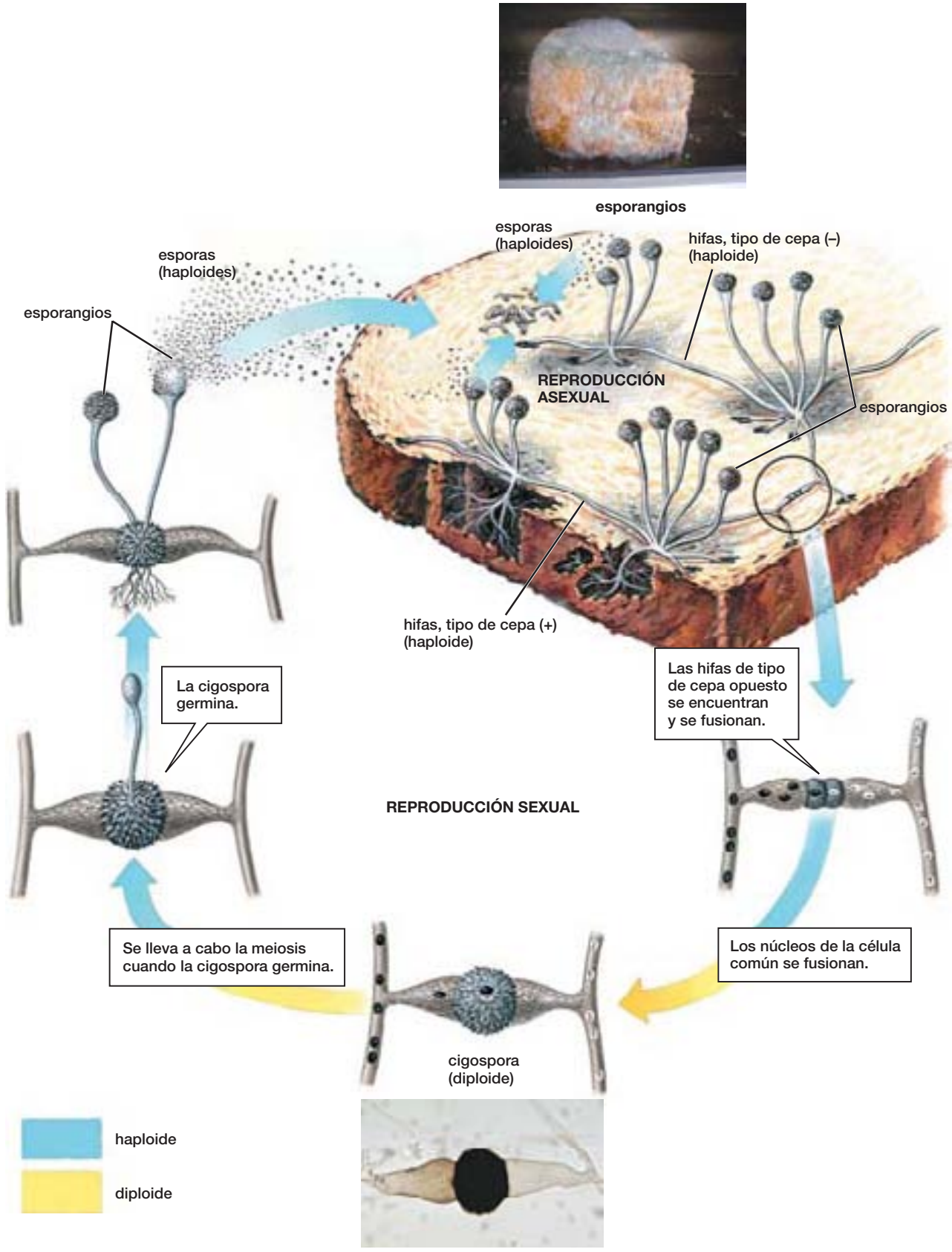


FIGURA 22-5 Ciclo de vida de un cigomiceto
Arriba: Durante la reproducción asexual del moho negro del pan (género *Rhizopus*), las esporas haploides, producidas dentro de los esporangios, se dispersan y germinan en los alimentos como el pan. Abajo: Durante la reproducción sexual, las hifas de diferentes tipos de cepa (designados como + y – en el pan) se ponen en contacto y se fusionan, para producir una cigospora diploide. La cigospora sufre meiosis y germina para producir esporangios. Éstos liberan esporas haploides.

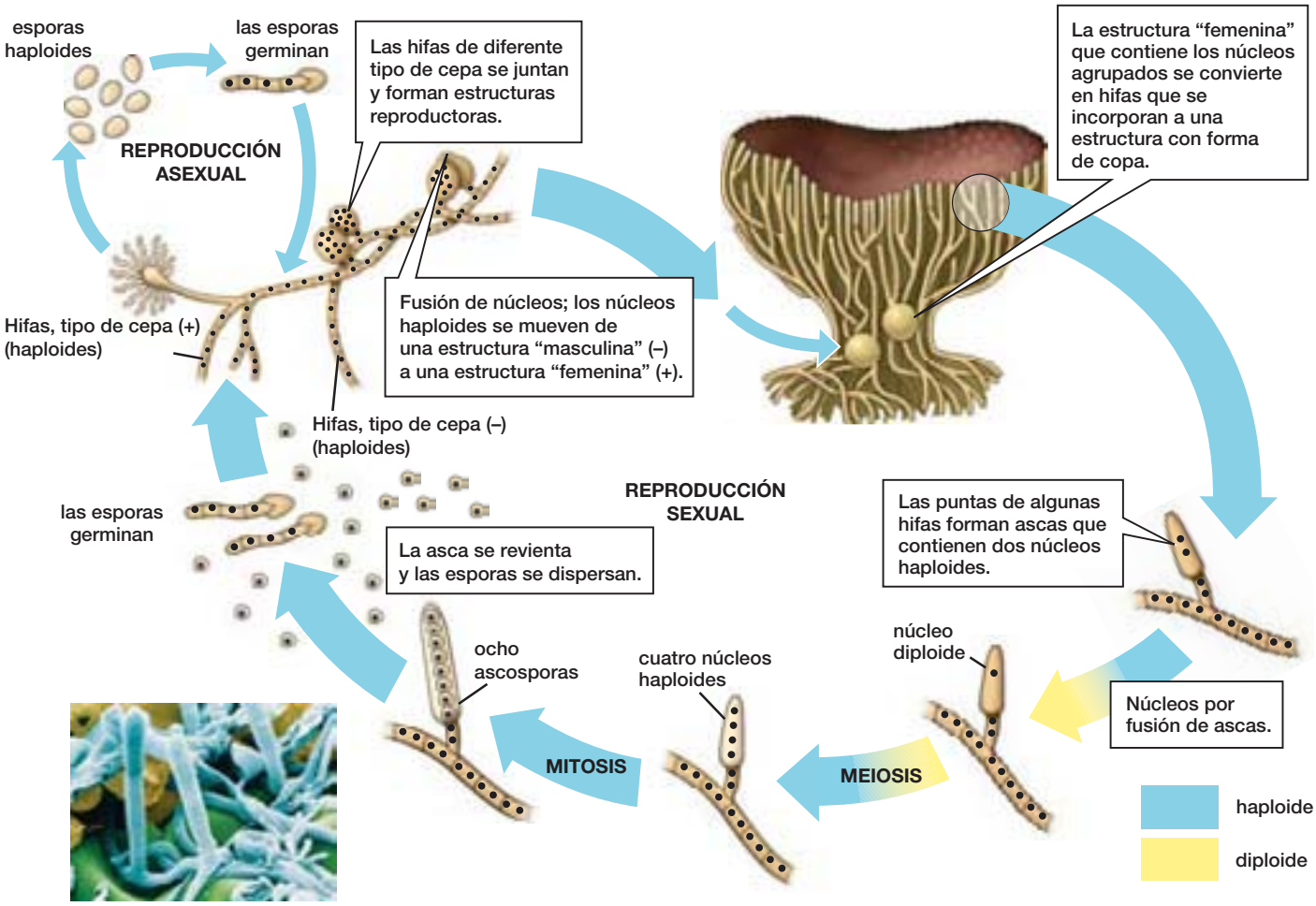

esporas haploides
las esporas germinan
Las hifas de diferente tipo de cepa se juntan y forman estructuras reproductoras.
La estructura "femenina" que contiene los núcleos agrupados se convierte en hifas que se incorporan a una estructura con forma de copa.
REPRODUCCIÓN ASEXUAL
Hifas, tipo de cepa (+) (haploides)
Fusión de núcleos; los núcleos haploides se mueven de una estructura "masculina" (–) a una estructura "femenina" (+).
Hifas, tipo de cepa (–) (haploides)
las esporas germinan
REPRODUCCIÓN SEXUAL
Las puntas de algunas hifas forman ascas que contienen dos núcleos haploides.
La asca se revienta y las esporas se dispersan.
núcleo diploide
ocho ascosporas
cuatro núcleos haploides
Núcleos por fusión de ascas.
MITOSIS
MEIOSIS
haploide
diploide

FIGURA 22-6 El ciclo de vida de un ascomiceto común
Parte superior: En la reproducción asexual de los ascomicetos, hifas haploides originan estructuras de tallo que producen esporas haploides. Parte inferior: En la reproducción sexual los núcleos haploides de diferentes tipos de cepa se fusionan para formar cigotos diploides que se dividen y originan ascosporas haploides. Las ascosporas se desarrollan dentro de estructuras llamada ascas, algunas de las cuales surgen de hifas como las de la fotografía.

a)

b)

FIGURA 22-7 Diversos ascomicetos
a) Cuerpo fructífero del hongo con forma de taza de sombrero escarlata. ***b)*** La morilla, un manjar comestible. (Consulta a un experto antes de degustar cualquier hongo silvestre. ¡Algunos son mortíferos!)

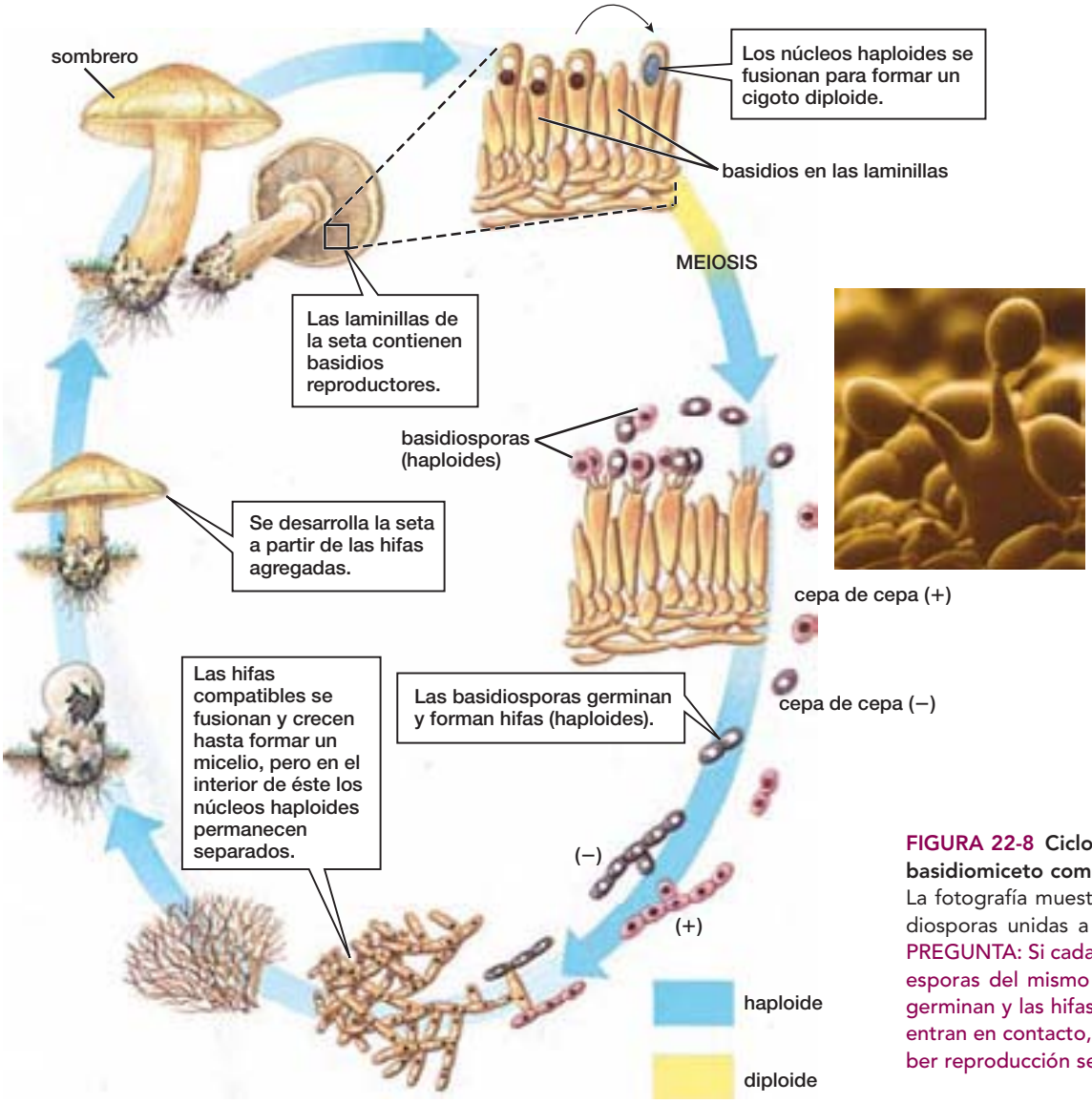

sombrero
Los núcleos haploides se fusionan para formar un cigoto diploide.
basidios en las laminillas
MEIOSIS
Las laminillas de la seta contienen basidios reproductores.
basidiosporas (haploides)
Se desarrolla la seta a partir de las hifas agregadas.
cepa de cepa (+)
cepa de cepa (−)
Las basidiosporas germinan y forman hifas (haploides).
Las hifas compatibles se fusionan y crecen hasta formar un micelio, pero en el interior de éste los núcleos haploides permanecen separados.
(−)
(+)
haploide
diploide

FIGURA 22-8 Ciclo vital de un basidiomiceto común
La fotografía muestra dos basidiosporas unidas a un basidio. PREGUNTA: Si cada una de dos esporas del mismo esporangio germinan y las hifas resultantes entran en contacto, ¿podría haber reproducción sexual?

Las dos hifas "se aparean sexualmente" y sus núcleos se fusionan para producir **cigosporas** diploides: las estructuras resistentes de las que este grupo toma su nombre. Las cigosporas pueden permanecer aletargadas durante largos periodos, hasta que las condiciones ambientales sean favorables para su crecimiento. Al igual que las esporas producidas asexualmente, las cigosporas se dispersan y germinan; pero en vez de producir nuevas hifas directamente sufren meiosis. En consecuencia, forman estructuras que contienen esporas haploides, las cuales se transforman en nuevas hifas.

Los ascomicetos forman esporas en una funda semejante a un saco

Los **ascomicetos**, u **hongos con saco**, también se reproducen tanto asexual como sexualmente (**FIGURA 22-6**). Las esporas asexuales de los hongos con saco se producen en la punta de unas hifas especializadas. Durante la reproducción sexual, las esporas se producen mediante una compleja serie de acontecimientos que se inicia con la fusión de hifas de dos tipos de cepa diferentes. Esta secuencia culmina con la formación de **ascas**, unas estructuras semejantes a sacos que contienen varias esporas y dan nombre a este filum.

Algunos ascomicetos viven en la vegetación forestal en descomposición y forman ya sea hermosas estructuras reproductoras en forma de taza (**FIGURA 22-7a**) o cuerpos fructíferos corrugados parecidos a setas y que se llaman *morillas* (**FIGURA 22-7b**). Este filum incluye asimismo muchos de los mohos de colores vistosos que atacan los alimentos almacenados y destruyen la fruta, las cosechas de granos y otras plantas, además de las levaduras (algunos de los pocos hongos unicelulares) y la especie que produce penicilina, el primer antibiótico.

Los basidiomicetos producen estructuras reproductoras con forma de clava

A los **basidiomicetos** se les llama **hongos de clava**, ya que producen estructuras reproductoras en forma de clava. En general, los miembros de este filum se reproducen sexualmente (**FIGURA 22-8**): hifas de diferentes tipos de cepa se fusionan para formar filamentos, en los cuales cada célula contiene dos núcleos, uno de cada progenitor. Los núcleos mismos no se fusionan hasta que se hayan formado células diploides especializadas, con forma de clava, llamadas **basidios**. Los basidios, a la vez, dan origen a **basidiosporas** reproductoras haploides por meiosis.

a)

b)

c)

FIGURA 22-9 Diversos basidiomicetos

El bejín gigante *Lycopedon giganteum* puede producir hasta 5 billones de esporas. ***b)*** Los hongos de repisa, del tamaño de platos para postre, son visibles en los árboles. ***c)*** Las esporas de los falos hediondos están en el exterior del sombrero mucilaginoso que tiene un olor muy desagradable para los seres humanos, pero que atrae a las moscas, las cuales depositan sus huevecillos en el hongo y, sin proponérselo, dispersan las esporas que se adhieren a su cuerpo. PREGUNTA: ¿Las estructuras que se muestran en estas fotografías son haploides o diploides?

La formación de basidios y basidiosporas tiene lugar en cuerpos fructíferos especiales que conocemos como champiñones, bejines, hongos de repisa y falos hediondos (**FIGURA 22-9**). Estas estructuras reproductoras son en realidad agregados densos de hifas que emergen en condiciones idóneas de un micelio subterráneo de gran tamaño. En la cara inferior de los champiñones o setas hay unas laminillas que parecen hojas y donde se producen basidios. Las basidiosporas se liberan por miles de millones desde las laminillas de las setas o a través de aberturas de la parte superior de los bejines, y se dispersan por el viento y el agua.

Si cae en suelo fértil, una basidiospora de seta puede germinar y formar hifas haploides. Estas hifas crecen hacia afuera a partir de la espora original, siguiendo una distribución aproximadamente circular, conforme las hifas más viejas del centro mueren. Periódicamente, el cuerpo subterráneo envía hacia arriba numerosas setas, que surgen en una distribución anular conocida como anillo de hada (**FIGURA 22-10**). El diámetro del anillo de hada indica la edad aproximada del hongo: cuanto más grande sea el diámetro del anillo, más viejo será el hongo que le da origen. Se estima que algunos anillos tienen 700 años de edad. Los micelios de los basidiomicetos pueden alcanzar edades aún mayores Por ejemplo, los investigadores que descubrieron el *Armillaria* gigante en Oregon estiman que a éste le tomó al menos 2400 años crecer hasta su tamaño actual.

22.3 ¿DE QUÉ MANERA INTERACTÚAN LOS HONGOS CON OTRAS ESPECIES?

Muchos hongos viven en contacto directo con otras especies durante periodos prolongados. Tales relaciones estrechas y de largo plazo se denominan *simbióticas*. En muchos casos el hongo de una relación simbiótica es parasitario y daña a su huésped. No obstante, algunas relaciones simbióticas son mutuamente benéficas.

Los líquenes se componen de hongos que viven con algas o bacterias fotosintéticas

Los **líquenes** son asociaciones simbióticas entre hongos y algas verdes unicelulares o cianobacterias (**FIGURA 22-11**

FIGURA 22-10 Anillo de hada de setas
Las setas surgen de un micelio micótico subterráneo y forman un anillo de hada, que crece hacia afuera a partir de un punto central donde germinó una sola espora, tal vez siglos antes.

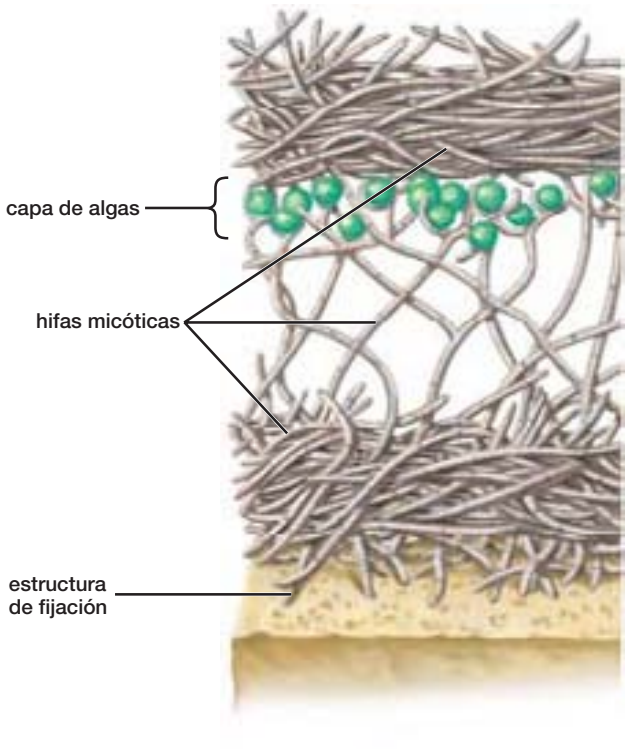
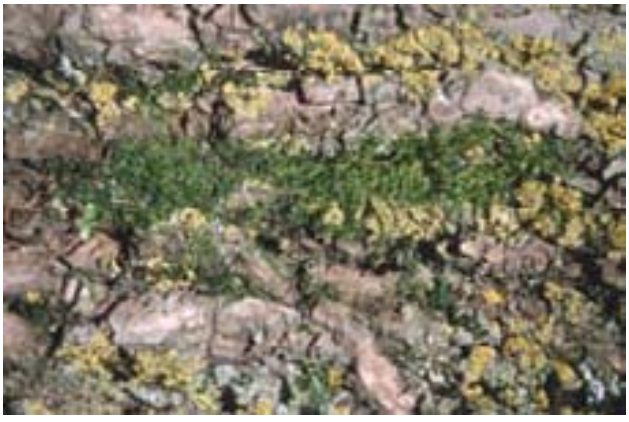


FIGURA 22-11 El liquen: una asociación simbiótica
La mayoría de los líquenes tienen una estructura en capas, limitada en las partes superior e inferior por una capa externa de hifas micóticas. Las estructuras de fijación formadas por hifas micóticas emergen de la capa inferior y anclan el líquen a una superficie, como una roca o un árbol. Una capa de algas donde las algas y los hongos crecen en estrecha asociación reside debajo de la capa superior de hifas.

zada por el descubrimiento de que, en los líquenes que incluyen algas simbiontes, las hifas micóticas penetran efectivamente las paredes celulares de las algas, de forma muy semejante a las hifas de los hongos que parasitan plantas.

Miles de especies de hongos (principalmente ascomicetos) forman líquenes (**FIGURA 22-12**), cada una en combinación con un número mucho más reducido de especies de algas o bacterias. Juntos, estos organismos forman unidades tan resistentes y autosuficientes que los líquenes se cuentan entre los primeros seres vivos en colonizar las islas volcánicas de reciente formación. Asimismo los líquenes de brillantes colores han invadido otros hábitat inhóspitos, desde desiertos hasta el Ártico, y crecen incluso en la roca desnuda. Como es de suponer, en ambientes extremos los líquenes crecen con gran lentitud; así, por ejemplo, las colonias árticas se expanden a razón



a)

b)

FIGURA 22-12 Diversos líquenes
a) Un liquen incrustado de vistosos colores, que crece sobre una roca seca, ilustra la tenaz independencia de esta combinación simbiótica de hongo y alga.

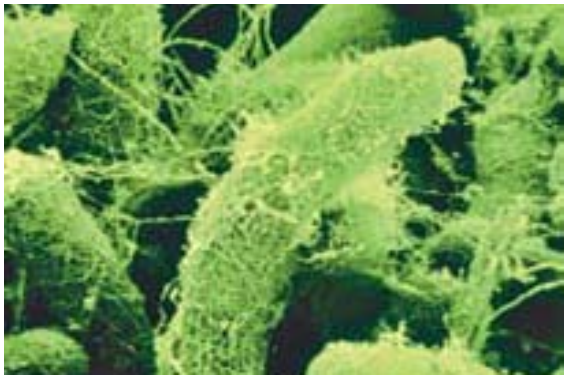


FIGURA 22-13 Las micorrizas favorecen el crecimiento de las plantas
Hifas de micorrizas entretejidas en torno a la raíz de un álamo temblón. Las plantas crecen mucho mejor en asociación simbiótica con estos hongos, que ayudan a poner los nutrimentos y el agua a disposición de las raíces.

de 2.5 a 5 centímetros cada 1000 años. Pese a su lento crecimiento, los líquenes persisten durante largos periodos; algunos líquenes del Ártico tienen más de 4000 años de edad.

Las micorrizas son hongos asociados con las raíces de plantas

Las **micorrizas** son importantes asociaciones simbióticas entre hongos y raíces de plantas. Se sabe de más de 5000 especies de hongos micorrícicos (que incluyen representantes de todos los grupos de hongos principales) que crecen en asociación íntima con alrededor del 80 por ciento de todas las plantas con raíces, incluyendo la mayoría de los árboles. Las hifas de los hongos micorrícicos rodean la raíz de la planta e invaden sus células (**FIGURA 22-13**).

Las micorrizas ayudan a las plantas a alimentarse

La asociación entre plantas y hongos beneficia a ambos socios. Los hongos micorrícicos reciben moléculas de azúcar ricas en energía que las plantas producen por fotosíntesis y que pasan de sus raíces al hongo. En cambio, el hongo digiere y absorbe minerales y nutrimentos orgánicos del suelo, y pasa algunos de ellos directamente a las células de la raíz. Los experimentos demuestran que el fósforo y el nitrógeno, nutrimentos fundamentales para el crecimiento vegetal, están entre las moléculas que las micorrizas llevan del suelo a las raíces. Estos hongos también absorben agua y la transfieren a la planta, lo cual constituye una ventaja para ésta en los suelos arenosos secos.

La vida común entre las micorrizas y las plantas tiene una contribución esencial para la vitalidad de las plantas terrestres. Las plantas que carecen de micorrizas suelen ser más pequeñas y más débiles que las plantas con hongos micorrícicos. De manera que la presencia de micorrizas incrementa la productividad general de las comunidades vegetales en la Tierra y, por ende, aumenta la capacidad para sustentar animales y otros organismos que dependen de las plantas.

Las micorrizas ayudan a las plantas a probar la tierra

Algunos científicos piensan que las asociaciones micorrícicas pudieron haber sido importantes en la invasión de la tierra por las plantas hace más de 400 millones de años. Una relación así entre un hongo acuático y una alga verde (antepasado de las plantas terrestres) quizás haya ayudado al alga a adquirir el agua y los nutrimentos minerales que necesitaba para sobrevivir fuera del agua.

El registro de fósiles es congruente con la hipótesis de que las micorrizas jugaron un papel importante en la colonización de la tierra por parte de las plantas. El fósil más antiguo de los hongos terrestres tiene aproximadamente 460 millones de años de antigüedad, casi la misma edad que los fósiles más viejos de las plantas terrestres. Tales hallazgos sugieren que los hongos y las plantas invadieron la tierra al mismo tiempo y quizá juntos. Además, los fósiles vegetales que se formaron poco después de dicha invasión muestran estructuras de raíces distintivas, parecidas a aquellas que se forman actualmente como respuesta ante la presencia de micorrizas. Esos fósiles muestran que micorrizas totalmente desarrolladas estuvieron presentes muy al principio de la evolución de las plantas terrestres y sugieren que una asociación planta-hongo más sencilla quizás ocurrió incluso antes.

Los endófitos son hongos que viven dentro de los tallos y las hojas de las plantas

La íntima asociación entre hongos y plantas no se limita a las micorrizas de la raíz. También se han encontrado hongos que viven dentro de tejidos que habitan en la superficie terrestre de prácticamente todas las especies vegetales en que se ha buscado su presencia. Algunos de estos *endófitos* (organismos que viven dentro de otro organismo) son parásitos que provocan enfermedades de las plantas; sin embargo, muchos —tal vez la mayoría— son benéficos para el huésped. Los casos mejor estudiados de endófitos micóticos benéficos son las especies de ascomicetos que viven dentro de las células de las hojas de muchas especies de césped. Estos hongos producen sustancias que son desagradables o tóxicas para los insectos y los mamíferos de pastoreo, y ayuda a proteger al césped de tales depredadores.

La protección contra depredadores que brindan los endófitos micóticos resulta tan suficientemente eficaz que los científicos están trabajando arduamente para descubrir una forma de desarrollar pastos que no tengan endófitos. Los caballos, las vacas y otros animales importantes de pastoreo suelen evitar comer césped que contienen endófitos. Cuando sólo está disponible como alimento el césped que contiene endófitos, los animales que lo consumen sufren de mala salud y lento crecimiento.

Algunos hongos son recicladores importantes

Al igual que las micorrizas y los endófitos, algunos hongos juegan un papel importante en el crecimiento y la conservación del tejido vegetal. No obstante, otros hongos juegan un papel similar en su destrucción. Únicos entre los organismos, los hongos pueden digerir tanto lignina como celulosa, las moléculas que forman la madera. Cuando un árbol u otra planta leñosa muere, sólo los hongos son capaces de descomponer sus restos.

Los hongos son los "empleados funerarios" de nuestro planeta, pues consumen no sólo madera muerta sino los "cadáveres" de todos los reinos. Los hongos que son *saprófitos* (que se alimentan de organismos muertos) regresan las sustancias componentes del tejido muerto a los ecosistemas de los cuales provienen. Las actividades digestivas extracelulares de los

FIGURA 22-14 Tizón del maíz
Este basidiomiceto patógeno ocasiona pérdidas por millones de dólares cada año en los cultivos de maíz. No obstante, incluso una plaga como el tizón del maíz tiene sus admiradores. En México, este hongo se conoce con el nombre de *huitlacoche* y se considera una delicia culinaria.

hongos saprofíticos liberan nutrimentos que las plantas pueden utilizar. Si los hongos y las bacterias desaparecieran repentinamente, las consecuencias serían desastrosas. Los nutrimentos permanecerían encerrados en los cuerpos de plantas y animales muertos, el reciclaje de los nutrimentos se detendría, la fertilidad del suelo disminuiría rápidamente, y los restos tanto orgánicos como no orgánicos se acumularían. En pocas palabras, el ecosistema se colapsaría.

22.4 ¿CÓMO AFECTAN LOS HONGOS A LOS SERES HUMANOS?

Por lo general, la gente piensa poco en los hongos, salvo quizá cuando aprecia ocasionalmente y por un momento el sabor de los champiñones en una pizza. Sin embargo, los hongos desempeñan un papel importante en la vida humana.

Los hongos atacan plantas que son importantes para las personas

Los hongos son causa de la mayoría de las enfermedades de las plantas y algunas de las plantas que infectan son importantes para los seres humanos. Por ejemplo, los hongos patógenos tienen un efecto devastador en la provisión de alimentos del mundo. Las plagas a vegetales por los basidiomicetos, que llevan los descriptivos nombres de *royas* y *tizones*, son particularmente nocivas y provocan daños por miles de millones de dólares cada año en los cultivos de cereales (**FIGURA 22-14**). Las enfermedades micóticas influyen asimismo en la apariencia de nuestros paisajes. El olmo americano y el castaño americano, dos especies de árboles que hace tiempo sobresalían en los parques, patios y bosques de Estados Unidos, fueron destruidos en escala masiva por los ascomicetos que causan la enfermedad del olmo holandés y la plaga del castaño. Actualmente pocos estadounidenses recuerdan las gráciles formas de los grandes olmos y castaños, pues casi han desaparecido por completo del paisaje.

Los hongos continúan atacando los tejidos vegetales mucho después de haber sido cosechados para uso humano. Para consternación de los propietarios de viviendas, una multitud de especies de hongos atacan la madera y la pudren. Ciertos mohos ascomicetos secretan las enzimas celulasa y proteasa, que causan importantes daños a los productos textiles de algodón y lana, especialmente en los climas húmedos y calurosos donde prosperan los mohos.

No obstante, los efectos de los hongos en la agricultura y la silvicultura no son todos negativos. Los hongos parásitos que atacan insectos y otras plagas de artrópodos pueden ser un importante aliado en el combate contra las plagas (**FIGURA 22-15a**). Los agricultores que desean reducir su dependencia de los plaguicidas químicos caros y tóxicos están usando cada vez más los métodos biológicos para el control de plagas, in-

a)

b)

FIGURA 22-15 Un útil hongo parásito
Los hongos patógenos pueden ser útiles para los seres humanos. Por ejemplo, un hongo como ***a)*** el *Cordyceps*, una especie que mató a un saltamontes, es utilizado por los granjeros para controlar las plagas de insectos. ***b)*** Algunos hongos podrían utilizarse para proteger a los seres humanos contra las enfermedades. Un mosquito portador de la malaria infectado por un Beauveria se transforma de un animal saludable (parte superior) en un cadáver incrustado en un hongo en menos de dos semanas.

cluyendo las aplicaciones de "fungicidas". En la actualidad se usan hongos patógenos para combatir diversas plagas, como termitas, el gorgojo del arroz, la oruga de librea, los áfidos y los ácaros de los cítricos. Además, los biólogos han descubierto que ciertos hongos atacan y matan especies de mosquitos que transmiten la malaria (**FIGURA 22-15b**). Se planea clasificar estos hongos para luchar contra una de las enfermedades más mortíferas del mundo.

Los hongos producen enfermedades humanas

El reino Fungi incluye especies parásitas que atacan directamente a los seres humanos. Entre las enfermedades micóticas más conocidas están las provocadas por ascomicetos que atacan la piel: pie de atleta, tiña inguinal y sarna. Estas enfermedades, aunque son desagradables, no ponen en riesgo la vida y, por lo general, se tratan eficazmente con ungüentos antimicóticos. Un tratamiento oportuno habitualmente consigue combatir otra enfermedad micótica común: las infecciones vaginales causadas por la levadura *Candida albicans* (**FIGURA 22-16**). Los hongos también infectan los pulmones cuando la víctima inhala esporas de los hongos causantes de enfermedades como la fiebre de los valles y la histoplasmosis. Al igual que otras infecciones por hongos, cuando se diagnostican oportuna y correctamente, estas enfermedades se pueden combatir con medicamentos antimicóticos; sin embargo, si no se tratan, llegan a convertirse en infecciones sistémicas graves. El cantante Bob Dylan, por ejemplo, enfermó gravemente de histoplasmosis cuando el hongo infectó su pericardio, es decir, la membrana que envuelve el corazón.

Los hongos pueden producir toxinas

Además de su papel como agentes de enfermedades infecciosas, algunos hongos producen toxinas peligrosas para los seres humanos. De particular interés son las toxinas que producen los hongos que crecen sobre los granos y otros alimentos que fueron almacenados en condiciones de excesiva humedad. Por ejemplo, los mohos del género *Aspergillus* producen unos compuestos cancerígenos altamente tóxicos conocidos como aflatoxinas. Algunos alimentos, como los cacahuates, parecen especialmente susceptibles al ataque por *Aspergillus*. Desde que se descubrieron las aflatoxinas en la década de 1960, los cultivadores y procesadores de alimentos han ideado métodos para reducir el crecimiento de *Aspergillus* en las cosechas almacenadas, de manera que se logró disminuir considerablemente la cantidad de aflatoxina en la mantequilla de cacahuate que consumimos.

Un hongo productor de toxinas tristemente célebre es el ascomiceto *Claviceps purpurea*, que infecta las plantas de centeno y causa una enfermedad conocida como cornezuelo del centeno. Este hongo produce varias toxinas que afectan a los seres humanos, cuando el centeno infectado se muele para convertirlo en harina y luego se consume. Esto sucedió con mucha frecuencia en el norte de Europa durante la Edad Media, con efectos devastadores. En ese tiempo, la intoxicación por cornezuelo era generalmente mortal, pero antes de morir, las víctimas experimentaban unos síntomas terribles. Una de las toxinas del cornezuelo es vasoconstrictora, lo cual significa que constriñe los vasos sanguíneos y reduce el flujo de sangre. El efecto puede ser tan intenso que genera gangrena y las extremidades se consumen y caen en pedazos. Otras toxinas del cornezuelo producen síntomas como sensación quemante, vómito, espasmos convulsivos y alucinaciones vívidas. En la actualidad, las nuevas técnicas agrícolas han permitido eliminar eficazmente la intoxicación por cornezuelo del centeno; aunque permanece un legado en la forma de la droga alucinógena LSD, que es un derivado de un componente de las toxinas del cornezuelo.

Muchos antibióticos se derivan de los hongos

Los hongos también han tenido repercusiones positivas en la salud humana. La era moderna de los medicamentos antibióticos que salvan vidas se inició con el descubrimiento de la penicilina, que es producida por un moho ascomiceto (**FIGURA 22-17**; véase la figura 1-5). La penicilina todavía se utiliza, junto con otros antibióticos derivados de hongos, como la oleandomicina y la cefalosporina, para combatir enfermedades bacterianas. Otros fármacos importantes también provienen de los hongos, entre ellos la ciclosporina, que se utiliza para suprimir la respuesta inmunitaria durante los trasplantes de órganos y reducir así la tendencia del organismo a rechazar el órgano extraño.

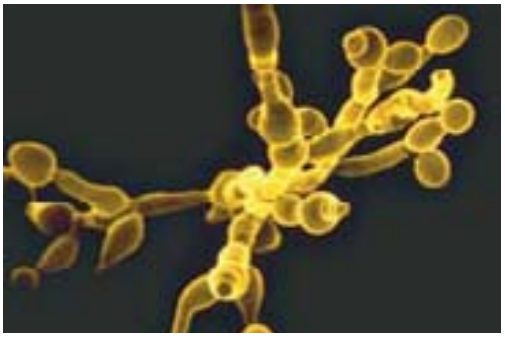


FIGURA 22-16 La insólita levadura
Las levaduras son unos ascomicetos fuera de lo común, normalmente no filamentosos, que se reproducen casi siempre por gemación. La levadura que aquí se muestra es *Candida*, una causa frecuente de infecciones vaginales.

FIGURA 22-17 Penicillium
Penicillium que crece sobre una naranja. Las estructuras reproductoras, que recubren la superficie del fruto, son visibles; debajo de ellas, las hifas extraen alimento del interior. El antibiótico penicilina se aisló por primera vez de este hongo. PREGUNTA: ¿Por qué algunos hongos producen químicos antibióticos?

GUARDIÁN DE LA TIERRA El caso de las setas que desaparecen

Los *micólogos*, es decir, los científicos que estudian los hongos, y los cocineros gastrónomos parecen tener poco en común; no obstante, en tiempos recientes los ha unido una preocupación común: las setas están disminuyendo rápidamente en términos de número, tamaño promedio y diversidad de especies. Aunque el problema se reconoce con más facilidad en Europa, donde la gente recolecta setas silvestres desde hace siglos, los micólogos estadounidenses están alarmados, pues también en Estados Unidos podría estar ocurriendo esa disminución. ¿Por qué están desapareciendo las setas? La recolección excesiva de setas comestibles no es la causa, porque las formas tóxicas están sufriendo el mismo fenómeno. La pérdida es evidente en cualquier tipo de bosques maduros, por lo que los cambios en las prácticas de administración de los bosques no podrían ser la causa. El agente más probable es la contaminación del aire, porque la pérdida de setas es máxima donde el aire presenta los niveles más altos de ozono, azufre y nitrógeno.

Aunque los micólogos aún no establecen con exactitud cómo daña la contaminación del aire a los hongos, los indicios son claros. En Holanda, por ejemplo, el número promedio de especies de hongos por cada 1000 metros cuadrados ha descendido de 37 a 12 en las últimas décadas. Veinte de las 60 especies estudiadas en Inglaterra están disminuyendo. La preocupación es aún mayor por el hecho de que los hongos más afectados son aquellos cuyas hifas forman asociaciones micorrícicas con las raíces de los árboles. Los árboles con menos micorrizas tienen menor resistencia a las sequías periódicas o a las rachas de frío intenso. Debido a que la contaminación del aire también daña directamente los bosques, la pérdida adicional de las micorrizas podría ser devastadora.

Los hongos hacen importantes aportaciones a la gastronomía

Los hongos hacen una importante contribución a la nutrición humana. Los componentes más evidentes de esta aportación son los hongos que consumimos directamente: champiñones y setas basidiomicetos tanto silvestres como cultivados, y ascomicetos como las morillas y la rara y apreciada trufa (véase la sección: "Conexiones evolutivas: El ingenio de los hongos: Cerdos, escopetas y lazos"). El papel de los hongos en la cocina, no obstante, también implica manifestaciones menos visibles. Por ejemplo, algunos de los quesos más famosos del mundo, como el Roquefort, el Camembert, el Stilton y el Gorgonzola, deben sus sabores característicos a los mohos ascomicetos que crecen en ellos mientras maduran. Quizá los contribuyentes micóticos más importantes y omnipresentes al suministro de alimentos, sin embargo, sean los ascomicetos unicelulares (unas pocas especies son basidiomicetos) conocidos como *levaduras*.

El vino y la cerveza se elaboran utilizando levaduras

que las levaduras cumplan su cometido es necesario hacer germinar los granos de cebada (recuérdese que los granos son en realidad semillas). Con la germinación, las plantas producen carbohidratos, por lo que la cebada germinada constituye una excelente fuente de alimento para las levaduras. Al igual que en el caso del vino, la fermentación convierte los azúcares en alcohol, pero los cerveceros atrapan el dióxido de carbono que se forma al mismo tiempo, para dar a la cerveza su característica carbonatación formadora de burbujas.

Las levaduras hacen que el pan se esponje

En la elaboración del pan, el dióxido de carbono es el producto de fermentación más importante. Las levaduras que se agregan a la masa de pan producen tanto alcohol como dióxido de carbono; pero el alcohol se evapora durante el horneado. En cambio, el dióxido de carbono queda atrapado en la masa, donde forma las burbujas que dan al pan su textura ligera y esponjosa (y nos salva de tener que comer emparedados de galleta toda la vida). Así, la próxima vez que usted disfrute de una rebanada de pan francés con queso Camembert y un buen vaso de Chardonnay, o una rebanada de pizza acompañada de una botella muy fría de su cerveza favorita, sería bueno agradecerlo en silencio a las levaduras. Nuestra dieta sería sin duda mucho más insípida sin la ayuda que nos brindan nuestros socios micóticos.

CONEXIONES EVOLUTIVAS

El ingenio de los hongos: Cerdos, escopetas y lazos

La selección natural, ejercida a lo largo de millones de años sobre las diversas formas de hongos, ha producido algunas notables adaptaciones que permiten a los hongos dispersar sus esporas y obtener nutrimentos.

La trufa, rara y deliciosa

Aunque muchos hongos son apreciados como alimento, ninguno se busca con tanta avidez como la trufa (**FIGURA 22-18**

ENLACES CON LA VIDA Recolecta con cuidado

A principios de la década de 1980, los médicos en un hospital de California notaron una curiosa tendencia. En unos cuantos meses se incrementó significativamente el número de pacientes que ingresaban para recibir el tratamiento por envenenamiento, y muchos de éstos murieron. ¿Qué causó ese repentino brote de envenenamiento? La investigación posterior reveló que en la mayoría de los casos las víctimas fueron inmigrantes recientes de Laos o Camboya. Luchando por adaptarse a su nuevo país, se sintieron maravillados al descubrir que los bosques californianos contenían setas que eran muy parecidas a las que colectaban para alimentarse en Asia. Por desgracia, la semejanza era sólo superficial; las setas eran en efecto especies venenosas. La búsqueda de estos inmigrantes para encontrar "alimentos emocionalmente nostálgicos" tuvo consecuencias funestas.

En general, los inmigrantes de países donde los hongos se colectan comúnmente han demostrado ser especialmente susceptibles al envenenamiento con setas tóxicas. Sin embargo, no son las únicas víctimas: cada año varios niños pequeños, recolectores inexpertos e invitados desafortunados a comidas gourmet realizan viajes inesperados al hospital después de ingerir setas silvestres venenosas.

Tal vez resulte divertido y gratificante recolectar setas silvestres, las cuales ofrecen algunos de los sabores más ricos y complejos que el ser humano puede experimentar. Pero si tú decides salir a recolectar, ten mucho cuidado porque algunos de los venenos más mortíferos conocidos están en las setas. En especial destacan por su veneno ciertas especies del género *Amanita*, cuyos sugerentes nombres comunes son sombrero de la muerte y ángel destructor (**FIGURA E22-1**). Tales nombres se ganaron a pulso, ya que incluso una sola mordida a alguna de estas setas podría ser mortal. El daño por las toxinas de la *Amanita* es más severo en el hígado, donde se suelen acumular las toxinas. A menudo las víctimas de envenenamiento con *Amanita* logran salvarse únicamente trasplantándoles un hígado. Así que asegúrate de proteger tu salud invitando a un experto a que te acompañe en tus expediciones en busca de setas.

FIGURA E22-1 El ángel destructor
El basisiomiceto *Amanita virosa* produce setas que pueden resultar mortales.

FIGURA 22-18 La trufa
Las trufas, unos ascomicetos poco comunes (cada uno del tamaño de una pequeña manzana), son un manjar gastronómico.

Cuando los cerdos excitados desentierran y devoran la trufa, millones de esporas se dispersan en el aire. Los recolectores de trufas utilizan cerdos con bozal para buscar a su presa. ¡Un buen cerdo trufero puede oler una trufa del subsuelo a 50 metros de distancia! En la actualidad los perros son los asistentes más comunes de los buscadores de trufas.

El método de la escopeta para dispersar esporas

Si uno se acerca lo suficiente a un montón de estiércol de caballo para escudriñarlo, quizá consiga observar las hermosas y delicadas estructuras reproductoras del cigomiceto *Pilobolus* (**FIGURA 22-19**). No obstante su finura, se trata en realidad de escopetas micóticas. Los bulbos transparentes, rematados con estuches de esporas negros y pegajosos, se extienden a partir de hifas que penetran en el estiércol. Conforme los bulbos maduran, la concentración de azúcar en su interior aumenta y succionan agua por ósmosis. Entre tanto, el bulbo comienza a debilitarse inmediatamente por debajo del sombrerillo. De improviso, y como un globo inflado en exceso, el bulbo revienta y lanza su estuche de esporas hasta una altura de un metro.

Las esporas arrastradas por el aire quizá se depositen en algunas hojas de césped, porque el *Pilobolus*

FIGURA 22-19 Un cigomiceto explosivo
Las delicadas y translúcidas estructuras reproductoras del cigomiceto *Pilobolus* se vuelan literalmente la cabeza cuando están maduras, para dispersar las cápsulas negras con su carga de esporas.

FIGURA 22-20 Némesis de los nematodos
Arthrobotrys, el estrangulador de nematodos (gusanos redondos), atrapa a su presa en una hifa modificada semejante a un lazo corredizo, la cual se hincha cuando algo entra en contacto con la superficie interior del lazo.

las consume un herbívoro, quizás un caballo, al pastar. Más tarde, y a cierta distancia de ahí, el caballo depositará un montón de estiércol fresco con esporas de *Pilobolus* que han pasado intactas a través de su conducto digestivo. Las esporas germinan y las hifas, al crecer, penetran en el estiércol (que es una rica fuente de nutrimentos) y, finalmente, lanzan nuevos proyectiles para continuar con este ingenioso ciclo.

La némesis de los nematodos

Los *nematodos* (gusanos redondos) microscópicos abundan en los suelos ricos; en tanto que los hongos han perfeccionado varias formas fascinantes de hifas para atrapar nematodos, que les permiten explotar esta rica fuente de proteína. Ciertos hongos producen vainas pegajosas que se adhieren a los nematodos que pasan y penetran en el cuerpo del gusano mediante hifas, las cuales comienzan entonces a digerir al gusano desde adentro. Una especie lanza una espora microscópica parecida a un arpón hacia los nematodos que pasan; la espora se convierte en un nuevo hongo dentro del gusano. El estrangulador de hongos *Arthrobotrys* produce lazos formados de tres células hifales. Cuando un nematodo entra en el lazo, su contacto con las partes internas del lazo es un estímulo que provoca que las células de éste se hinchen de agua (**FIGURA 22-20**). En una fracción de segundo, el orificio se contrae y atrapa al gusano. Después, las hifas del hongo penetran y se dan un banquete con su presa.

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO HONGOS DESCOMUNALES

¿Por qué el hongo *Armillaria* crece tanto? En parte su tamaño se debe a su capacidad para formar rizomorfos, los cuales consisten en hifas agrupadas dentro de una corteza protectora. Las hifas así encerradas llevan nutrimentos a los rizomorfos, y les permiten extenderse grandes distancias por las áreas con insuficiencia de nutrimentos, para obtener nuevas fuentes de alimentos. Los hongos *Armillaria*, entonces, pueden crecer más allá de los límites de una región específica rica en alimento.

Otro factor que puede contribuir con el enorme tamaño del *Armillaria* de Oregon es el clima donde se encuentra. En esta región árida, los cuerpos fructíferos micóticos se forman sólo rara vez, de manera que el colosal *Armillaria* rara vez produce esporas. En ausencia de esporas que podrían desarrollarse como nuevos individuos, el individuo existente enfrenta poca competencia por los recursos, y está en libertad para crecer y cubrir una área cada vez más grande.

El descubrimiento del espécimen de Oregon es únicamente el último capítulo de una benéfica "guerra de los hongos" a largo plazo, que empezó en 1992 con el descubrimiento de la primera seta enorme, un *Armillaria gallica* de 150,000 m^2 que crece en Michigan. Desde ese importante descubrimiento inicial, los grupos de investigadores en Michigan, Washington, y Oregon se han enfrascado en una amistosa competencia para encontrar el hongo más grande. ¿Algún día se romperá el récord existente? Permanece atento.

Piensa en esto Como todo el Armillaria de Oregon creció a partir de una sola espora, todas sus células son genéticamente idénticas. Sin embargo, no todas sus partes son fisiológicamente dependientes entre sí, por lo que es poco probable que alguna sustancia recorra los 9 kilómetros cuadrados del micelio. Tampoco hay una epidermis, membrana o corteza que cubra todo el micelio y lo aísle del ambiente como una unidad. ¿La uniformidad genética del hongo es evidencia suficiente para considerarse un solo individuo, o se requiere de una mayor integración fisiológica? ¿Crees que sea válido el título de "el organismo más grande del mundo"?

REPASO DEL CAPÍTULO

RESUMEN DE CONCEPTOS CLAVE

22.1 ¿Cuáles son las principales características de los hongos?

Los cuerpos micóticos se componen generalmente de hifas filamentosas, que son multicelulares o multinucleadas, y forman grandes redes entretejidas llamadas micelios. Los núcleos de los hongos por lo común son haploides. Una pared celular de quitina envuelve las células micóticas.

Todos los hongos son heterótrofos, secretan enzimas digestivas afuera de su cuerpo y absorben los nutrimentos que se liberan.

Los hongos se reproducen de formas variadas y complejas. La reproducción asexual se lleva a cabo ya sea por fragmentación del micelio o por formación de esporas asexuales. Las esporas sexuales se forman una vez que los núcleos haploides se fusionan para formar un cigoto diploide, que sufre meiosis para formar esporas sexuales haploides. Las esporas, tanto asexuales como sexuales, producen micelios haploides por mitosis.

Web tutorial 22.1 La estructura y reproducción de los hongos

22.2 ¿Cuáles son los principales grupos de hongos?

Los principales *fila* de los hongos, así como sus características, se resumen en la tabla 22-1.

Web tutorial 22.2 Clasificación de los hongos

22.3 ¿Cómo interactúan los hongos con otras especies?

Un liquen es una asociación simbiótica entre un hongo y algas o cianobacterias. Esta combinación autosuficiente puede colonizar rocas desnudas. Las micorrizas son asociaciones entre hongos y las raíces de casi todas las plantas vasculares. El hongo obtiene sus nutrimentos fotosintéticos de las raíces de la planta y, a cambio, lleva agua y nutrimentos del suelo circundante al interior de la raíz. Los endófitos son hongos que crecen dentro de las hojas o los tallos de las plantas, y que ayudan a proteger las plantas que los tienen. Los hongos saprofíticos son agentes de descomposición sumamente importantes en los ecosistemas. Sus cuerpos filamentosos penetran en los suelos ricos y en el material orgánico en descomposición, y liberan nutrimentos por digestión extracelular.

22.4 ¿Cómo afectan los hongos a los seres humanos?

La mayoría de las enfermedades de las plantas se deben a hongos parásitos. Algunos hongos parásitos ayudan a combatir las plagas de insectos en los cultivos. Otros producen enfermedades humanas, como la tiña, el pie de atleta y las infecciones vaginales ordinarias. Algunos hongos producen toxinas que pueden dañar a los seres humanos. Pese a ello, los hongos confieren variedad a las opciones alimentarias humanas; en tanto que la fermentación con hongos permite elaborar vino, cerveza y pan.

TÉRMINOS CLAVE

ascomiceto *pág. 429*
asca *pág. 429*
basidio *pág. 429*
basidiomiceto *pág. 429*
basidiospora *pág. 429*
cigomiceto *pág. 426*
cigospora *pág. 429*
espora *pág. 425*
esporangio *pág. 426*
hifa *pág. 424*
hongo con saco *pág. 429*
hongo de clava *pág. 429*
liquen *pág. 430*
micelio *pág. 424*
micorriza *pág. 432*
quitridiomicetos *pág. 425*
septo *pág. 424*

RAZONAMIENTO DE CONCEPTOS

Describe la estructura del cuerpo micótico. ¿En qué difieren las células micóticas de la mayoría de las células vegetales y animales?

¿Qué parte del cuerpo micótico está representada por las setas, los bejines y otras estructuras similares? ¿Por qué sobresalen del suelo dichas estructuras?

¿Cuáles son dos enfermedades de las plantas, causadas por hongos parásitos, que han tenido enormes repercusiones en los bosques de Estados Unidos? ¿A qué *fila* pertenecen estos hongos?

Menciona algunos hongos que ataquen los cultivos. ¿A qué filum pertenece cada uno?

5. Describe la reproducción asexual de los hongos.
6. ¿Cuál es el ingrediente estructural principal de la pared celular de los hongos?
7. Señala los principales *fila* de los hongos, describe la característica de la que cada una toma su nombre y cita un ejemplo de cada una.
8. Describe la formación de un anillo de hada en setas. ¿Por qué existe una relación entre el diámetro y la edad del anillo?
9. Describe dos asociaciones simbióticas entre hongos y organismos de otros reinos. En cada caso, explica el efecto de estas asociaciones en cada uno de los socios.

APLICACIÓN DE CONCEPTOS

1. En Estados Unidos, la enfermedad del olmo holandés se debe a un organismo *exótico*, es decir, un organismo (en este caso un hongo) introducido desde otra parte del mundo. ¿Qué daño ha causado esa introducción? ¿Qué otras plagas de hongos pertenecen a esta categoría? ¿Por qué es grande la probabilidad de que un hongo parásito sea transportado fuera de su hábitat natural? ¿Qué pueden hacer los gobiernos para limitar esta importación?
2. El descubrimiento de la penicilina revolucionó el tratamiento de las enfermedades bacterianas. Sin embargo, en la actualidad rara vez se prescribe penicilina. ¿A qué se debe esto? *Sugerencia*: Consulta el capítulo 15.
3. El descubrimiento de la penicilina fue el resultado de una observación fortuita de un microbiólogo muy curioso: Alexander Fleming. ¿Cómo harías una búsqueda sistemática de nuevos antibióticos producidos por hongos? ¿Dónde buscarías esos hongos?
4. Los restos fósiles indican que existían asociaciones micorrícicas entre hongos y raíces vegetales hacia finales de la era paleozoica, cuando las plantas iniciaron la invasión de la tierra. Este dato sugiere un vínculo importante entre las micorrizas y la exitosa invasión de la tierra por las plantas. ¿Por qué fueron importantes las micorrizas en la colonización de hábitat terrestres por las plantas?
5. Los textos de biología general de la década de 1960 incluían a los hongos en el reino vegetal. ¿Por qué los biólogos ya no consideran a los hongos como miembros legítimos del reino vegetal?
6. ¿Qué consecuencias ecológicas se producirían si los seres humanos, mediante un nuevo y letal fungicida, destruyeran a todos los hongos del planeta?

PARA MAYOR INFORMACIÓN

Barron, G. "Jekyll-Hyde Mushrooms". *Natural History*, marzo de 1992. Los hongos asumen diversas formas; unos absorben material vegetal en descomposición y otros se alimentan de gusanos microscópicos.

Dix, N. J. y Webster, J. *Fungal Ecology*. Londres: Chapman & Hall, 1995. Una exposición más bien técnica, pero comprensible y de fácil lectura, de la diversidad de los hongos; se concentra en los papeles que los hongos desempeñan en las diferentes comunidades ecológicas.

Hudler, G. W. *Magical Mushrooms, Mischievous Molds*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1998. Interesante tratamiento de los hongos, con especial atención a su importancia en los asuntos humanos.

Kiester, E. "Prophets of Gloom". *Discover*, noviembre de 1991. Los líquenes sirven como indicadores de la calidad del aire y aportan indicios del deterioro de las condiciones ambientales.

Money, N. P. *Carpet Monster and Killer Spores: A Natural History of Toxic Mold*, Nueva York: Oxford University Press, 2004. Un excelente relato sobre el estatus biológico, toxicológico y legal de algunos de los hongos que se alimentan en habitaciones humanas.

Schaechter, E. *In the Company of Mushrooms*. Cambridge: Harvard University Press, 1997. Accesible descripción del mundo de los hongos, escrita en un estilo ameno y personal.

Vogel, S. "Taming the Wild Morel". *Discover*, mayo de 1988. Describe las investigaciones que han permitido cultivar en el laboratorio estos raros manjares.

CAPÍTULO 23

Diversidad animal I: Invertebrados

El calamar gigante es el animal invertebrado más grande de la Tierra, pero nuestra única observación de un calamar gigante vivo en su hábitat natural se reduce a un breve video.

DE UN VISTAZO

ESTUDIO DE CASO: Búsqueda de un monstruo marino

23.1 ¿Cuáles son las principales características de los animales?

23.2 ¿Qué características anatómicas marcan los puntos de bifurcación en el árbol evolutivo de los animales?

La carencia de tejidos separados distingue a las esponjas de todos los demás animales

Los animales con tejidos presentan simetría ya sea radial o bilateral

La mayoría de los animales bilaterales tienen cavidades corporales

Los organismos bilaterales se desarrollan en una de dos formas

Los protostomados incluyen dos líneas evolutivas distintas

23.3 ¿Cuáles son los principales fila de animales?

Las esponjas tienen un cuerpo simple

Los cnidarios son depredadores bien armados

Los gusanos planos tienen órganos pero carecen de sistemas respiratorio y circulatorio

Los anélidos están formados por segmentos idénticos

La mayoría de los moluscos tienen conchas

Enlaces con la vida: Ayudantes de cirujanos

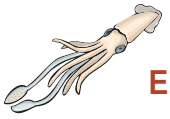
Los artrópodos son los animales que dominan la Tierra

Los gusanos redondos abundan y en su mayoría son diminutos

Los equinodermos tienen un esqueleto de carbonato de calcio

Los cordados incluyen a los vertebrados

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO
Búsqueda de un monstruo marino



ESTUDIO DE CASO BÚSQUEDA DE UN MONSTRUO MARINO

TODO EL MUNDO SE SIENTE ATRAÍDO POR EL MISTERIO, y uno en el que intervenga un temible depredador gigante, es aún más atractivo. Consideremos el calamar gigante, *Architeuthis,* que es el animal invertebrado más grande del mundo, ya que alcanza longitudes de 18 metros o más. Cada uno de sus enormes ojos, los más grandes del reino animal, puede llegar a ser tan grande como una cabeza humana. Sus 10 tentáculos, dos de los cuales son más largos que los demás, están cubiertos de potentes ventosas, las cuales contienen afilados ganchos semejantes a garras que le sirven para sujetar mejor la presa y llevársela a la boca, donde un pico dotado de fuertes músculos la desgarra. El calamar gigante es uno de los organismos más imponentes del planeta y, sin embargo, no hay ninguna información respecto de sus hábitos y modo de vida. ¿Qué come? ¿Nada con la cabeza levantada o dirigida hacia abajo? ¿Cómo se aparea? ¿Vive solo o en grupos? Incluso estas preguntas tan fundamentales acerca del comportamiento del calamar gigante aún permanecen sin respuesta, porque lo único que conocemos acerca del calamar gigante en su hábitat natural es lo que se ha observado a través de un video de corta duración.

Nuestro limitado conocimiento científico acerca del calamar gigante proviene en su totalidad de especímenes que se han hallado ya muertos o moribundos, arrojados a las playas por el oleaje, atrapados en las redes de los pescadores o en los estómagos de cachalotes (los cuales consumen cantidades enormes de calamares, entre los que ocasionalmente se encuentran algunos calamares gigantes). Se ha recabado información de más de 200 de estos especímenes a lo largo del siglo pasado, así como descripciones por escrito de cadáveres de calamares del siglo XVI. Los calamares vivos, no obstante, siguen siendo esquivos porque habitan en aguas oceánicas profundas, lejos del alcance de los buzos.

Clyde Roper, un biólogo del Instituto Smithsoniano, ha dedicado gran parte de su vida profesional a localizar y estudiar a los calamares gigantes en su hábitat. Al final de este capítulo hablaremos de algunos de los métodos de búsqueda submarina del doctor Roper, después de examinar la extraordinaria diversidad de los animales invertebrados.

23.1 ¿CUÁLES SON LAS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS ANIMALES?

Es difícil formular una definición concisa del término "animal". No hay un rasgo individual que caracterice a todos los animales, así que definiremos el grupo con base en una lista de características. Ninguna de ellas es exclusiva de los animales pero, en conjunto, permiten distinguirlos de los miembros de otros reinos:

- Los animales son multicelulares.
- Los animales obtienen su energía consumiendo el cuerpo de otros organismos.
- Por lo regular, se reproducen sexualmente. Aunque las especies animales presentan una enorme diversidad de estilos de reproducción, casi todos son capaces de llevar a cabo la reproducción sexual.
- Las células animales carecen de pared celular.
- Los animales tienen motilidad (pueden trasladarse) durante alguna etapa de su vida. Incluso las esponjas estacionarias tienen una etapa *larvaria* (una forma juvenil) durante la que nadan libremente.
- La mayoría de los animales pueden responder rápidamente a los estímulos externos como resultado de la actividad de las células nerviosas, el tejido muscular o ambos.

23.2 ¿QUÉ CARACTERÍSTICAS ANATÓMICAS MARCAN LOS PUNTOS DE BIFURCACIÓN EN EL ÁRBOL EVOLUTIVO DE LOS ANIMALES?

Ya para el periodo cámbrico, que se inició hace 544 millones de años, casi todos los fila de animales que pueblan actualmente la Tierra, estaban presentes. Por desgracia, el registro fósil del precámbrico es escaso y no revela la secuencia en la cual surgieron los fila de animales. Por consiguiente, los sistemáticos especializados en animales han buscado pistas acerca de la historia evolutiva de éstos en sus características anatómicas y su desarrollo embriológico, así como en las secuencias del DNA. Estas investigaciones han demostrado que ciertas características marcan los puntos de bifurcación principales en el árbol evolutivo de los animales, y representan las piedras angulares en la evolución de las diferentes estructuras

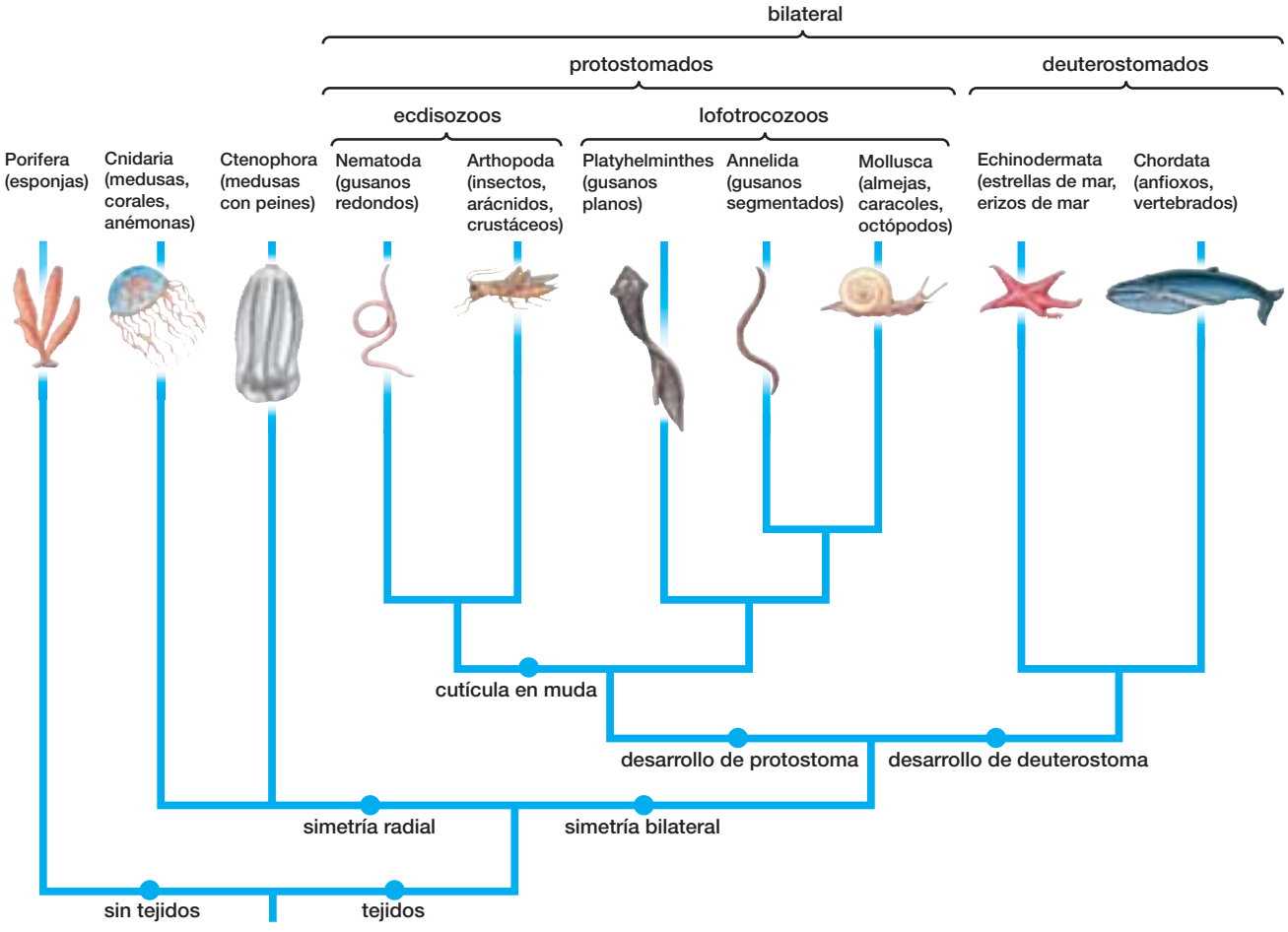


FIGURA 23-1 Árbol evolutivo de algunos de los principales *fila* de animales

corporales de los animales modernos (FIGURA 23-1). En los siguientes apartados describiremos estos hitos evolutivos y su legado en el cuerpo de los animales modernos.

La carencia de tejidos separados distingue a las esponjas de todos los demás animales

Una de las primeras innovaciones importantes de la evolución animal fue la aparición de **tejidos**, es decir, grupos de células similares integradas en una unidad funcional, por ejemplo, un músculo. En la actualidad casi todos los animales tienen un cuerpo con tejidos, y los únicos animales que han conservado la primitiva carencia de tejidos son las esponjas. En éstas, las células individuales pueden tener funciones especializadas, pero actúan de manera más o menos independiente y no están organizadas en tejidos verdaderos. Esta peculiar característica de las esponjas sugiere que la bifurcación entre las esponjas y la rama evolutiva que dio origen a todos los demás fila de animales debe haber tenido lugar en una etapa muy temprana de la historia de los animales. Un antepasado común sin tejidos, muy antiguo, dio origen tanto a las esponjas como a los demás fila con tejidos.

Los animales con tejidos presentan simetría ya sea radial o bilateral

El advenimiento evolutivo de los tejidos coincidió con la aparición de la simetría corporal; todos los animales con tejidos verdaderos también tienen cuerpos simétricos. Se dice que un animal es simétrico si se puede bisecar a lo largo de al menos un plano, de tal manera que las mitades resultantes sean imágenes en espejo una de la otra. A diferencia de las esponjas asimétricas, todo animal tiene una superficie superior, o *dorsal*, y una superficie inferior, o *ventral*.

Los animales con tejidos simétricos se clasifican en dos grupos: uno comprende a los animales con **simetría radial** (FIGURA 23-2a) y el otro incluye a los animales que muestran **simetría bilateral** (FIGURA 23-2b). En el caso de la simetría radial, cualquier plano que pase por un eje central divide el organismo en mitades aproximadamente iguales. En cambio, un animal bilateralmente simétrico puede dividirse en mitades aproximadamente como imágenes en espejo sólo a lo largo de un plano individual específico que pasa por el eje central.

La diferencia entre los animales con simetría radial y bilateral refleja otro punto de bifurcación importante en el árbol evolutivo animal. Esta bifurcación separó a los antepasados de los cnidarios (medusas, anémonas y corales) y ctenóforos (medusas con peines) radialmente simétricos, de los ancestros de los demás fila de animales, todos los cuales tienen simetría bilateral.

Los animales con simetría radial tienen dos capas tisulares embrionarias; los animales con simetría bilateral tienen tres

La distinción entre la simetría radial y la bilateral en los animales está estrechamente vinculada con una diferencia correspondiente en el número de capas de tejido, llamadas *capas germinales*, que se forman durante el desarrollo embrionario. Los embriones de animales con simetría radial tienen dos capas germinales: una interior o **endodermo** (que constituye el revestimiento de casi todos los órganos huecos), y otra exterior o **ectodermo** (que forma el tejido que cubre el cuerpo y reviste sus cavidades internas y tejidos nerviosos). Los embriones de animales con simetría bilateral tienen una tercera capa germinal. Entre el endodermo y el ectodermo se encuentra una capa de **mesodermo** (que forma los músculos y, cuando están presentes, los sistemas circulatorio y esquelético).

La evolución paralela del tipo de simetría y el número de capas germinales nos ayuda a entender el caso potencialmente enigmático de los equinodermos (estrellas de mar, pepinos de mar y erizos de mar). Los equinodermos adultos son de simetría radial; sin embargo, nuestro árbol evolutivo los sitúa por completo en el grupo bilateralmente simétrico. Esto se debe a que los equinodermos tienen tres capas germinales, así como varias características adicionales, algunas de las cuales se describirán más adelante, que los agrupan con los animales bilateralmente simétricos. Así pues, los ancestros inmediatos de los equinodermos debieron haber sido bilateralmente simétricos y, más tarde, el grupo adquirió por evolución una simetría radial (un caso de evolución convergente). Aún ahora, los equinodermos larvarios conservan su simetría bilateral.

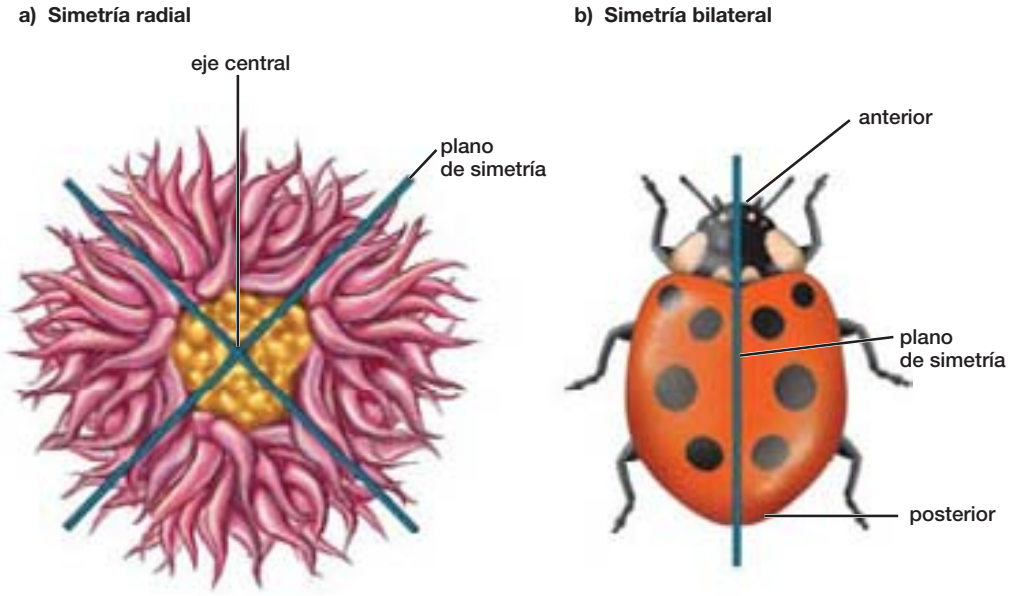


FIGURA 23-2 Simetría corporal y cefalización
a) Los animales con simetría radial carecen de una cabeza bien definida. Todo plano que atraviese el eje central dividirá el cuerpo en mitades que son imágenes en espejo. ***b)*** Los animales con simetría bilateral tienen un extremo de cabeza anterior y un extremo de cola posterior. El cuerpo se puede dividir en mitades que son imágenes de espejo sólo a lo largo de un plano particular que pasa por la línea media.

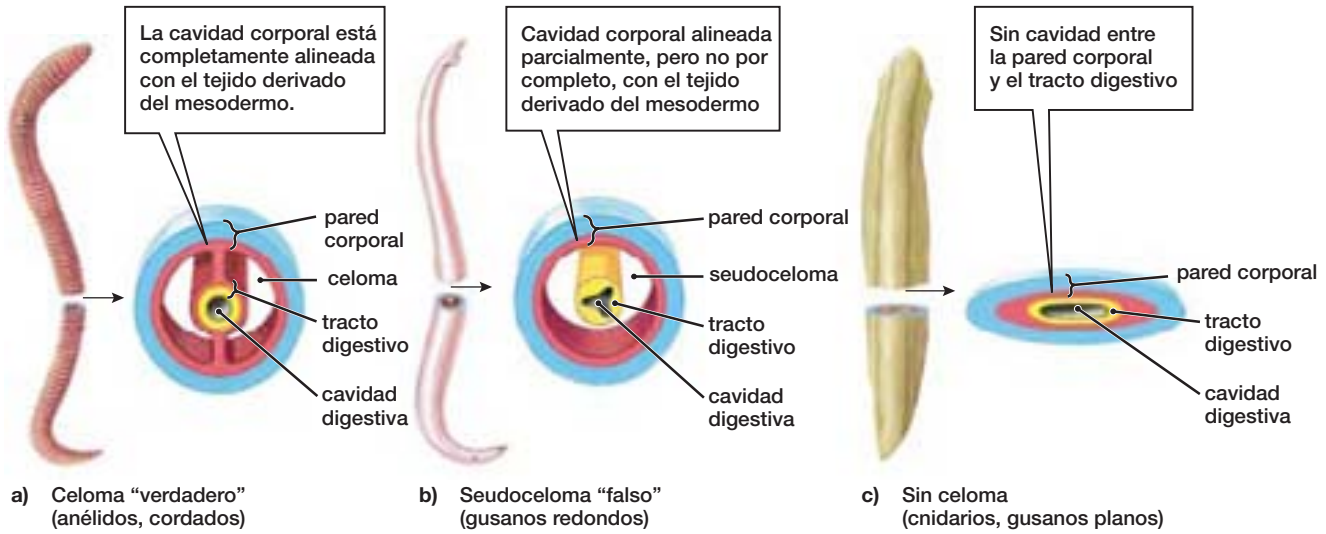

La cavidad corporal está completamente alineada con el tejido derivado del mesodermo.
pared corporal
celoma
tracto digestivo
cavidad digestiva
Cavidad corporal alineada parcialmente, pero no por completo, con el tejido derivado del mesodermo
pared corporal
seudoceloma
tracto digestivo
cavidad digestiva
Sin cavidad entre la pared corporal y el tracto digestivo
pared corporal
tracto digestivo
cavidad digestiva
a) Celoma "verdadero" (anélidos, cordados)
b) Seudoceloma "falso" (gusanos redondos)
c) Sin celoma (cnidarios, gusanos planos)

FIGURA 23-3 Cavidades corporales
a) Los anélidos tienen un celoma verdadero. ***b)*** Los gusanos redondos son seudocelomados. ***c)*** Los gusanos planos no tienen cavidad entre la pared corporal y el tracto digestivo. (Los tejidos que se muestran en azul se derivan del ectodermo, los rojos del mesodermo, y los amarillos del endodermo).

Los animales bilaterales tienen cabeza

Los animales con simetría radial tienden a ser *sésiles* (es decir, a estar fijos en un punto, como las anémonas de mar) o a vagar a la deriva arrastrados por las corrientes (como las medusas). Estos animales pueden toparse con alimento o peligros provenientes de cualquier dirección, por lo que su cuerpo que "mira" en todas direcciones a la vez, resulta una ventaja. Por contraste, la mayoría de los animales de simetría bilateral tienen *motilidad* (es decir, se desplazan por medios propios en una dirección determinada). Los animales suelen encontrar recursos como el alimento mediante la parte de su cuerpo que esté más cerca de la dirección del movimiento. Por consiguiente, la evolución de la simetría bilateral estuvo acompañada de **cefalización**, es decir, la concentración de órganos sensoriales y un cerebro en una región definida de la cabeza. La cefalización produce un extremo *anterior* (cabeza), donde se concentran las células y los órganos sensoriales, los grupos de células nerviosas y los órganos que digieren los alimentos. El otro extremo de un animal cefalizado se designa como *posterior* y puede presentar una cola (véase la figura 23-2b).

La mayoría de los animales bilaterales tienen cavidades corporales

al brindar apoyo al cuerpo y un armazón que sirve de apoyo para que puedan actuar los músculos. En otros animales los órganos internos están suspendidos dentro de una cavidad llena de líquido, la cual sirve como amortiguador de protección entre ellos y el mundo exterior.

La estructura de la cavidad corporal varía entre los fila

El tipo más diseminado de cavidad corporal es un **celoma**, esto es, una cavidad llena de líquido que está completamente revestida de una capa delgada de tejido que se desarrolla a partir del mesodermo (**FIGURA 23-3a**). Los fila cuyos miembros tienen un celoma se llaman *celomados.* Los anélidos (gusanos segmentados), los artrópodos (insectos, arañas, crustáceos), moluscos, (almejas y caracoles), equinodermos y cordados (que incluyen a los humanos) son fila de celomados.

Los miembros de algunos fila tienen una cavidad corporal que *no está* completamente rodeada por tejido derivado del mesodermo. Este tipo de cavidad se conoce como **seudoceloma**, y los fila cuyos miembros lo presentan se conocen colectivamente como *seudocelomados* (**FIGURA 23-3b**). Los gusanos redondos (nematodos) son el grupo más grande de seudocelomados.

Algunos fila de animales bilaterales no tienen ninguna cavidad corporal y se les conoce como *acelomados.* Por ejemplo, los gusanos planos no tienen cavidad entre su intestino y la pared corporal; en vez de ello, el espacio está lleno de tejido sólido (**FIGURA 23-3c**).

Las cavidades corporales más simples evolucionaron a partir de los planos del cuerpo celomado

Puesto que los planos de cuerpo acelomado y seudocelomado parecen ser más "primitivos" que el plano de un cuerpo celomado, alguna vez se pensó que los fila *acelomados y seudocelomados*

a) b) c)

FIGURA 23-4 Diversidad de las esponjas
Las esponjas presentan una extensa variedad de tamaños, formas y colores. Algunas como ***a)*** esta esponja de fuego crecen en una distribución de forma libre sobre las rocas submarinas. ***b)*** Esta esponja tubular se fija a las rocas mediante diminutos apéndices, mientras que ***c)*** esta esponja de los arrecifes, con aberturas tubulares ensanchadas, se adhiere a los arrecifes de coral. PREGUNTA: Las esponjas con frecuencia se describen como los animales más "primitivos". ¿Cómo un organismo tan primitivo ha llegado a ser tan diverso y abundante?

tán todos íntimamente relacionados unos con otros, sino que forman ramas en varios puntos del árbol evolutivo de los animales (véase la figura 23-1). Así, los planos corporales de acelomados y seudocelomados no son precursores evolutivos del celoma, sino que son modificaciones de éste.

Los organismos bilaterales se desarrollan en una de dos formas

Entre los fila de animales bilaterales, el desarrollo embriológico sigue una variedad de caminos. Sin embargo estas variadas vías pueden agruparse en dos categorías conocidas como desarrollo de **protostoma** y **deuterostoma.** En el desarrollo de protostoma, la cavidad corporal se forma dentro del espacio que hay entre la pared corporal y la cavidad digestiva. En el desarrollo de deuterostoma, la cavidad corporal se forma como una excrecencia de la cavidad digestiva. Los dos tipos de desarrollo también difieren en el patrón de la división celular que se inicia inmediatamente después de la fecundación y en el método por medio del cual se forman la boca y el ano. Los protostomados y deuterostomados son ramas evolutivas características dentro de los animales bilaterales. Los anélidos, artrópodos y moluscos presentan el desarrollo de protostomas, mientras que los equinodermos y los cordados tienen deuterostomas.

Los protostomados incluyen dos líneas evolutivas distintas

Los fila de animales protostomados se dividen en dos grupos, los cuales corresponden a dos linajes diferentes que divergieron de forma temprana en la historia evolutiva de los protostomados. Un grupo, los *ecdisozoos*, incluye fila como los de los artrópodos y los gusanos redondos, cuyos miembros tienen el cuerpo cubierto por una capa exterior que se desprende periódicamente. El otro grupo se conoce como el de los *lofotrocozoos* e incluye los fila cuyos miembros tienen una estructura alimentaria especial llamada lofóforo, así como algunos fila cuyos miembros pasan por una etapa de desarrollo llamada larva trocófora. Los moluscos, anélidos y gusanos planos son ejemplos del filum lofotrocozoos.

23.3 ¿CUÁLES SON LOS PRINCIPALES FILA DE ANIMALES?

Es fácil pasar por alto las diferencias entre la multitud de animales pequeños y sin huesos que existen en el mundo. Aun Carolus Linnaeus, el creador del sistema moderno de clasificación, reconocía sólo dos fila de animales sin espina dorsal (insectos y gusanos). Sin embargo, en la actualidad los biólogos reconocen 27 fila de animales, algunos de los cuales aparecen en la **tabla 23-1**.

Por comodidad, los biólogos suelen clasificar a los animales en una de dos categorías principales: los **vertebrados**, es decir, los que tienen espina dorsal (o columna vertebral) y los **invertebrados**, aquellos que carecen de espina dorsal. Los vertebrados, que estudiaremos en el capítulo 24, son quizá los animales más llamativos desde el punto de vista de los humanos, pero menos del 3 por ciento de todas las especies de animales conocidas en la Tierra son vertebrados. La inmensa mayoría de los animales son invertebrados.

Los primeros animales probablemente se originaron a partir de las colonias de protistas cuyos miembros se habían especializado en la ejecución de distintas funciones dentro de la colonia. Comenzaremos nuestro estudio de los animales invertebrados con las esponjas, cuyo plano corporal es el que más se asemeja a las probables colonias ancestrales de protozoarios.

Las esponjas tienen un cuerpo simple

Las *esponjas* (filum Porifera) se encuentran en la mayoría de los ambientes marinos y acuáticos. La mayor parte de las 5000 o más especies de esponjas en la Tierra viven en agua salada, y habitan en las aguas oceánicas tibias y frías, profundas o poco profundas. Además, algunas esponjas viven en hábitat de agua dulce como los lagos y ríos. Las esponjas adultas viven adheridas a las rocas u otras superficies submarinas. Por lo general no se mueven, aunque los investigadores han demostrado que algunas especies, al menos cuando están cautivas en los acuarios, son capaces de desplazarse (muy lentamente, unos cuantos milímetros al día). Las esponjas se presentan en

Comparación de los principales fila de animales

Nombre común (filum)		Esponjas (Porifera)	Hidras, anémonas, medusas (Cnidaria)	Gusanos planos (Plathyelminthes)
Arreglo corporal	Nivel de organización	Celulares; carecen de tejidos y órganos	Tejidos; carecen de órganos	Sistema de órganos
	Capas germinales	Ausentes	Dos	Tres
	Simetría	Ausente	Radial	Bilateral
	Cefalización	Ausente	Ausente	Presente
	Cavidad corporal	Ausente	Ausente	Ausente
	Segmentación	Ausente	Ausente	Ausente
Sistemas internos	Sistema digestivo	Intracelular	Cavidad gastrovascular; en algunos intracelular	Cavidad gastrovascular
	Sistema circulatorio	Ausente	Ausente	Ausente
	Sistema respiratorio	Ausente	Ausente	Ausente
	Sistema excretor (regulación de líquidos)	Ausente	Ausente	Canales con células ciliadas
	Sistema nervioso	Ausente	Red nerviosa	Ganglios en la cabeza con cordones nerviosos longitudinales
	Reproducción	Sexual; asexual (gemación)	Sexual; asexual (gemación)	Sexual (algunos hermafroditas); asexual (división del cuerpo)
	Sostén	Endoesqueleto de espículas	Esqueleto hidrostático	Esqueleto hidrostático
	Número de especies conocidas	5000	9000	20,000

varias formas y tamaños. Algunas especies tienen una forma bien definida, pero otras crecen en una forma libre sobre las rocas submarinas (FIGURA 23-4). Las esponjas más grandes pueden llegar a medir más de 1 metro de altura.

Las esponjas carecen de tejidos verdaderos y de órganos. En cierto sentido, una esponja se asemeja a una colonia de organismos unicelulares. Las propiedades de las esponjas que se asemejan a las colonias, quedaron de manifiesto en un experimento que realizó el embriólogo H. V. Wilson en 1907. Wilson machacó una esponja y la hizo pasar a través de un trozo de tela de seda, con lo cual la desintegró en células individuales y en grupos de células. Después colocó esos diminutos fragmentos de esponja en agua de mar y esperó durante tres semanas. Al término del experimento, las células se habían unido de nuevo para formar una esponja en buenas condiciones, con lo que demostró que las células individuales de la esponja habían podido sobrevivir y realizar sus funciones de manera independiente.

Todas las esponjas tienen un plano corporal similar. El cuerpo tiene muchos poros diminutos por los que entra el agua y, en menor número, aberturas grandes por donde se expele. En el interior de la esponja misma, el agua viaja por medio de canales, y conforme va pasando se le extrae el oxígeno, se filtran los microorganismos que contiene y se llevan a células

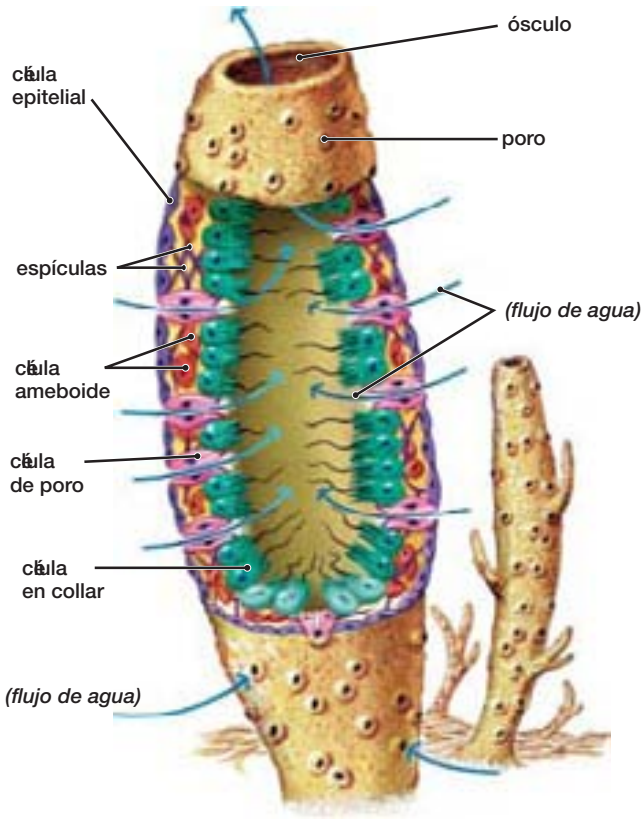


FIGURA 23-5 Plano corporal de las esponjas
El agua entra a través de numerosos poros diminutos del cuerpo de la esponja y sale por los ósculos. Las partículas de alimento microscópicas son filtradas del agua.

Gusanos segmentados (Annelida)	Caracoles, almejas, calamares (Mollusca)	Insectos, arácnidos, crustáceos (Arthropoda)	Gusanos redondos (Nematoda)	Estrellas de mar, erizos de mar (Echinodermata)
Sistema de órganos	Sistema de órganos	Sistema de órganos	Sistema de órganos	Sistema de órganos
Tres	Tres	Tres	Tres	Tres
Bilateral	Bilateral	Bilateral	Bilateral	Bilateral en las larvas, radial en los adultos
Presente	Presente	Presente	Presente	Ausente
Celoma	Celoma	Celoma	Seudoceloma	Celoma
Presente	Ausente	Presente	Ausente	Ausente
Boca y ano separados	Boca y ano separados	Boca y ano separados	Boca y ano separados	Boca y ano separados (normalmente)
Cerrado	Abierto	Abierto	Ausente	Ausente
Ausente	Branquias, pulmones	Tráqueas, agallas o pulmones en libro	Ausente	Pies tubulares, branquias cutáneas, árbol respiratorio
Nefridios	Nefridios	Glándulas excretoras semejantes a nefridios	Células glandulares excretoras	Ausente
Ganglios en la cabeza con pares de cordones ventrales; ganglios en cada segmento	Cerebro bien desarrollado en algunos cefalópodos; varios pares de ganglios principalmente en la cabeza; red nerviosa en la pared corporal	Ganglios en la cabeza con pares de cordones ventrales; ganglios en los segmentos, algunos fusionados	Ganglios en la cabeza con cordones nerviosos dorsales y ventrales	Sin ganglios en la cabeza; anillo nervioso y nervios radiales; red nerviosa en la piel
Sexual (algunos hermafroditas)	Sexual (algunos hermafroditas)	Normalmente sexual	Sexual (algunos hermafroditas)	Sexual (algunos hermafroditas); asexual por regeneración (poco frecuente)
Esqueleto hidrostático	Esqueleto hidrostático	Exoesqueleto	Esqueleto hidrostático	Endoesqueleto de placas debajo de la piel externa
9000	50,000	1,000,000	12,000	6500

individuales donde son digeridos; luego se expulsan los residuos (**FIGURA 23-5**).

Las esponjas tienen tres tipos principales de células, cada uno de los cuales se especializa en una función. Las *células epiteliales* aplanadas cubren las superficies externas del cuerpo. Algunas células epiteliales modificadas constituyen las *células de poro*, que rodean a los poros, controlan su tamaño y regulan el flujo de agua. Los poros se cierran ante la presencia de sustancias nocivas. Las *células en collar* mantienen un flujo de agua a través de la esponja agitando un flagelo que penetra en el canal interior. Los collares que rodean al flagelo actúan como un tamiz fino que filtra los microorganismos que luego serán ingeridos por la célula. Parte del alimento se hace llegar a las *células ameboides,* las cuales vagan libremente entre las células epiteliales y en collar, digieren y distribuyen los nutrimentos, dan origen a las células reproductoras y secretan pequeñas protuberancias esqueléticas llamadas *espículas*. Las espículas pueden estar compuestas por carbonato de calcio (calcita), sílice (vidrio), o proteína y forman un esqueleto interior que brinda sostén al cuerpo (véase la figura 23-5). Las esponjas naturales de uso doméstico, las cuales ahora se remplazan con imitaciones fabricadas a base de celulosa, son en realidad esqueletos de esponja.

Las esponjas se pueden reproducir asexualmente por **gemación**, durante la cual la esponja adulta produce versiones tamaño miniatura de sí misma que se desprenden y adoptan una existencia independiente. En forma alterna, pueden reproducirse sexualmente por medio de la fusión de espermatozoides y óvulos. Los óvulos fecundados se desarrollan en el interior de la esponja adulta hasta convertirse en larvas activas que escapan a través de los ósculos del cuerpo de la esponja. Las corrientes de agua dispersan las larvas hacia nuevas zonas, donde se establecen y se convierten en esponjas adultas.

Puesto que las esponjas permanecen en un solo sitio y carecen de concha protectora, son vulnerables al ataque de los depredadores como los peces, tortugas y babosas de mar. Sin embargo, muchas esponjas han desarrollado defensas químicas contra los depredadores. Los cuerpos de estas esponjas contienen sustancias químicas que son tóxicas o desagradables para los depredadores potenciales. Por fortuna, cierto número de estas sustancias han resultado ser medicamentos valiosos para el hombre. Por ejemplo, el fármaco espongistatina, un compuesto que inicialmente se aisló de las esponjas, es un novedoso fármaco para curar las infecciones causadas por hongos que con frecuencia padecen los enfermos de SIDA. Otros medicamentos derivados de las esponjas incluyen las más recientes y prometedoras drogas anticancerígenas, discodermolide y halichondrin. El descubrimiento de éstos y otros fármacos ha despertado grandes esperanzas de que los investigadores encuentren otras especies que tal vez lleguen a ser una fuente valiosa de nuevos fármacos.

Los cnidarios son depredadores bien armados

Al igual que las esponjas, las cerca de 9000 especies conocidas de *cnidarios* (filum Cnidaria), que incluyen medusas, anémo-

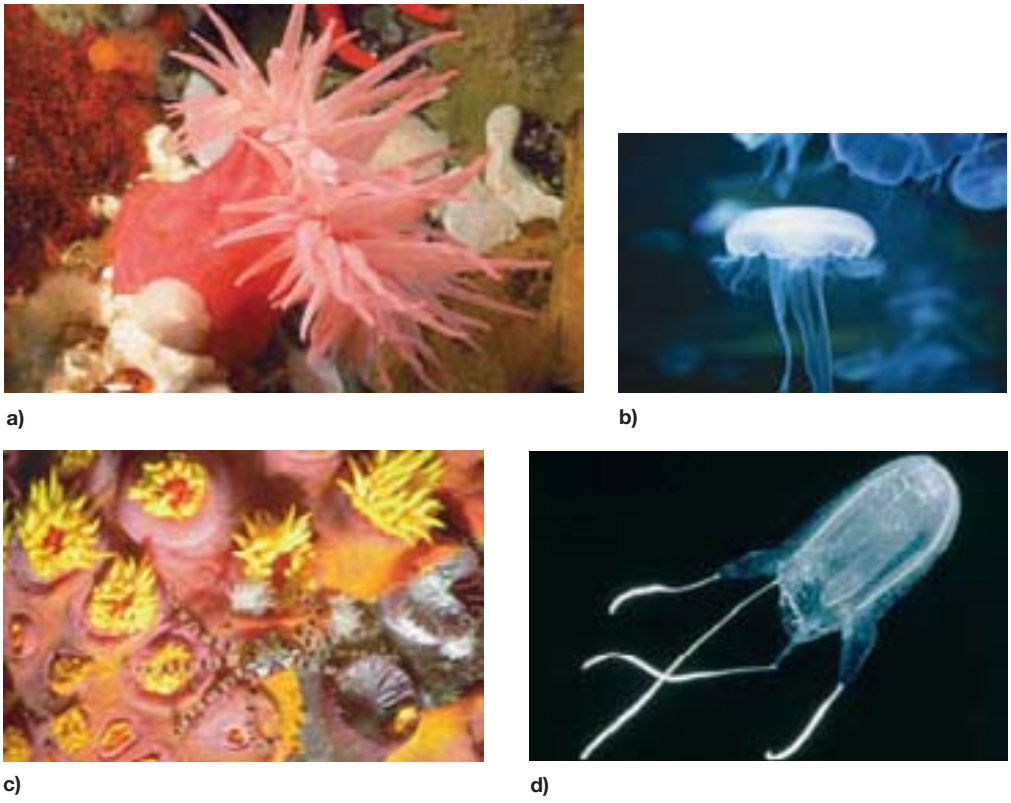


FIGURA 23-6 Diversidad de los cnidarios

Una anémona con manchas rojas extiende sus tentáculos para capturar presas. ***b)*** Una medusa pequeña. ***c)*** Este acercamiento de un coral permite observar los pólipos de color amarillo brillante en diversas etapas de extensión de sus tentáculos. Abajo a la derecha, en las zonas donde el coral ha muerto queda expuesto el esqueleto de carbonato de calcio que sostiene los pólipos y forma el arrecife. Un cangrejo (artrópodo) con un diseño sorprendente reposa sobre el coral mientras sujeta anémonas blancas con sus tenazas. Los tentáculos urticantes protegen al cangrejo. ***d)*** Una avispa de mar, un cnidario cuyas células urticantes contienen uno de los venenos más tóxicos que se conocen. PREGUNTA: En cada una de estas fotografías, ¿el organismo que se observa es un pólipo o una medusa?

nas de mar, corales e hidrozoos, están confinados a hábitat acuáticos, y casi todas las especies son marinas. La mayoría de los cnidarios son pequeños, ya que miden desde unos pocos milímetros a unos cuantos centímetros de diámetro, pero la medusa más grande puede tener hasta 2.4 metros de ancho y tentáculos de 50 metros de largo. Todos los cnidarios son depredadores carnívoros.

Las células de los cnidarios están organizadas en tejidos definidos, incluido el tejido contráctil que actúa como si fuera músculo. Las células nerviosas están organizadas en un tejido llamado *red nerviosa*, que se ramifica por todo el cuerpo y controla el tejido contráctil para generar movimiento y comportamientos de alimentación. Sin embargo, la mayoría de los cnidarios carecen de órganos verdaderos y no tienen cerebro.

Los cnidarios tienen gran variedad de formas hermosas que causan asombro (**FIGURA 23-6**), y todas ellas son variaciones de dos configuraciones corporales básicas: el *pólipo* (**FIGURA 23-7a**) y la *medusa* (**FIGURA 23-7b**). El pólipo que por lo general es de forma tubular se ha adaptado a una vida tranquila adherido a las rocas. Tiene tentáculos, los cuales son prolongaciones que se dirigen hacia arriba para atrapar e inmovilizar a la presa. El cuerpo acampanado de la medusa flota en el agua y se deja llevar por las corrientes, al tiempo que arrastra sus tentáculos tras de sí como si fueran múltiples cañas de pescar.

Muchas especies de cnidarios tienen ciclos vitales que incluyen etapas de pólipos y medusas, aunque algunas especies viven solamente como pólipos y otras sólo como medusas. Tanto los pólipos como las medusas se han desarrollado a partir de dos capas germinales: el endodermo interior y el ectodermo exterior; entre estas capas hay una sustancia gelatinosa. Los pólipos y las medusas tienen simetría radial, y las partes del cuerpo están arregladas formando un círculo alrededor de la boca y la cavidad digestiva (véase la figura 23-2a). Este arreglo de partes favorece mucho a estos animales que están fijos o que flotan libremente porque esto los capacita para responder ante la presencia de una presa, o bien, de alguna amenaza proveniente de cualquier dirección.

Los tentáculos de los cnidarios están armados de *cnidocitos*, células con estructuras que, al ser estimuladas al contacto, inyectan explosivamente sus filamentos venenosos o pegajosos a la presa (**FIGURA 23-8**). Estas células punzantes, que se encuentran solamente en los cnidarios, sirven para capturar presas. Los cnidarios no son cazadores activos, sino que esperan a que aparezca la presa, por casualidad, al alcance de sus largos tentáculos, la inyectan, la sujetan firmemente y luego la llevan hasta su boca expansible y hacia la bolsa digestiva,

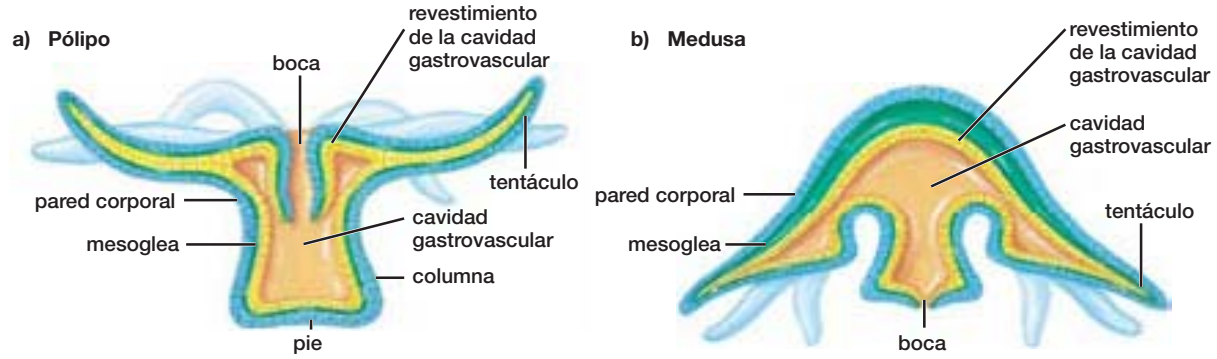


FIGURA 23-7 Pólipo y medusa
a) La forma del pólipo se observa en la hidra (véase la figura 23-8), en las anémonas de mar (figura 23-6a) y en los pólipos individuales dentro de un coral (figura 23-6c). ***b)*** La forma de medusa que se observa en la figura 23-6b se asemeja a un pólipo invertido. (Los tejidos que se muestran en color azul se derivan del ectodermo, y los de color amarillo del endodermo).

la *cavidad gastrovascular*. Las enzimas digestivas secretadas al interior de esta cavidad desintegran parte del alimento, y después tiene lugar la digestión dentro del revestimiento celular de la cavidad. Puesto que la cavidad gastrovascular tiene sólo una abertura, el material sin digerir es expelido a través de la boca una vez que termina la digestión. Aunque este tráfico de dos sentidos evita la alimentación continua, es adecuada para satisfacer los requerimientos de poca energía de estos animales.

Los cnidarios se pueden reproducir sexual o asexualmente. Los ciclos reproductivos varían considerablemente entre los diferentes tipos de cnidarios, pero un patrón es bastante común en las especies con las etapas de pólipo y medusa. En tales especies, los pólipos comúnmente se reproducen por gemación asexual, lo que da origen a nuevos pólipos. Sin embargo, en ciertas circunstancias, la gemación originará medusas, en vez de pólipos. Una vez que una medusa crece y alcanza la madurez, puede liberar gametos (espermatozoides u óvulos) en el agua. Si se encuentra un espermatozoide con un óvulo, pueden unirse para formar un cigoto que se desarrolla en una larva ciliada que nada libremente. Con el tiempo, la larva se establece sobre una superficie dura, donde se desarrolla en pólipo.

El veneno de algunos cnidarios puede causar dolorosas picaduras en las personas que por desgracia llegan a tener contacto con ellos, y las picaduras de algunas especies de medusas llegan incluso a poner en peligro la vida. La más mortífera de estas especies es la "avispa de mar", *Chironex fleckeri*, que habita en las aguas próximas a las costas del norte de Australia y del sudeste asiático. La cantidad de veneno presente en una sola de estas avispas de mar podría matar hasta 60 personas, y la víctima de esta picadura grave puede morir en cuestión de minutos, después del suceso.

Un grupo de cnidarios, los corales, tiene una importancia ecológica particular (véase la figura 23-6c). Los pólipos del coral forman colonias, y cada miembro de la colonia secreta un esqueleto duro de carbonato de calcio. Los esqueletos persisten mucho tiempo después de que muere el organismo, y sirven como base para que otros individuos se unan. El ciclo continúa después de miles de años, hasta que se forman los arrecifes de coral masivos.

Los arrecifes de coral se encuentran en los océanos de aguas templadas y frías. Los de agua fría se forman en las aguas profundas y, aunque están ampliamente distribuidos, hasta ahora están llamando la atención de los investigadores, pero todavía no se han estudiado a fondo. Los arrecifes de coral de aguas templadas son más familiares y están restringidos a las aguas de los trópicos, tibias, transparentes y poco profundas. Aquí, los arrecifes coralinos forman hábitat subacuáticos, los cuales son la base de un ecosistema de asombrosa diversidad y belleza incomparable.

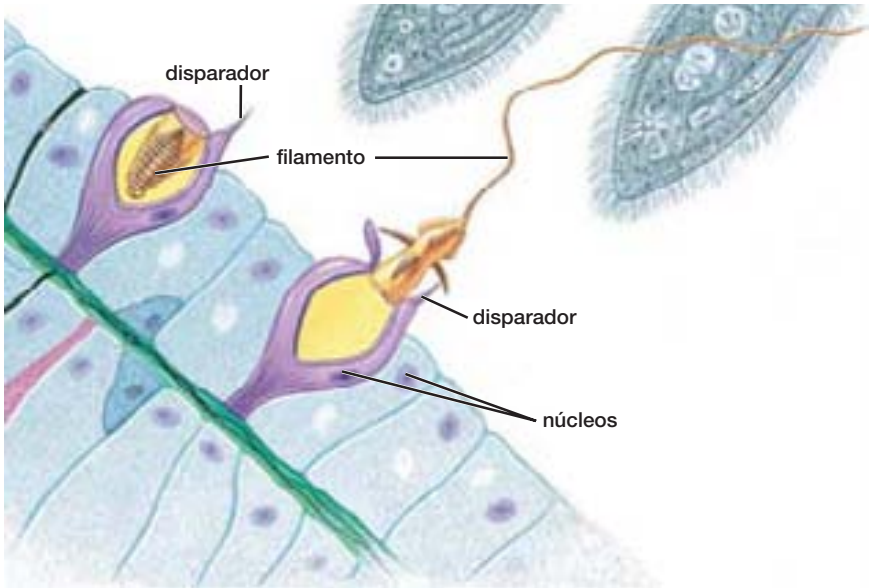


FIGURA 23-8 Armamento de los cnidarios: el cnidocito
Al más leve contacto con el disparador de una estructura especial de sus cnidocitos, los cnidarios, como en esta hidra, expelen un filamento envenenado.

a)

b)

c)

FIGURA 23-9 Diversidad de gusanos planos

Este gusano plano es un ejemplo de parásito. ***b)*** Las manchas oculares se observan con claridad en la cabeza de este gusano plano que vive libremente en agua dulce. ***c)*** Muchos de estos gusanos planos que habitan en los arrecifes de coral tropicales son de brillantes colores.

Los gusanos planos tienen órganos pero carecen de sistemas respiratorio y circulatorio

Los *gusanos planos*

FIGURA 23-9a). (Los **parásitos** son organismos que viven dentro de o sobre el cuerpo de otro organismo llamado *huésped*, el cual resulta dañado por esa relación). Los gusanos planos no parásitos viven en hábitat marinos, acuáticos y terrestres húmedos. Tienden a ser pequeños y pasan desapercibidos (FIGURA 23-9b), pero algunos son de color brillante, de diseño espectacular y residentes de los acantilados coralíferos del trópico (FIGURA 23-9c).

A diferencia de los cnidarios, los gusanos planos tienen órganos bien desarrollados, en los que los tejidos se agrupan en unidades funcionales. Por ejemplo, la mayoría de los gusanos planos de vida independiente tienen órganos sensoriales, que incluyen las manchas oculares (véase la figura 23-9b) para percibir la luz y la oscuridad, así como células que responden a los estímulos químicos y táctiles. Para procesar la información, los gusanos planos tienen en la cabeza grupos de células nerviosas llamadas **ganglios** que forman un cerebro sencillo. Unas estructuras neuronales pares, llamadas **cordones nerviosos**, transmiten las señales nerviosas hacia los ganglios y desde ellos.

A pesar de contar con algunos órganos, los gusanos planos carecen de sistemas respiratorio y circulatorio. En ausencia de un sistema respiratorio, el intercambio de gases se realiza por medio de la difusión directa entre las células corporales y el ambiente. Este modo de respiración es posible gracias al tamaño pequeño y a la forma aplanada del cuerpo de estos gusanos, los cuales garantizan que ninguna célula corporal quede muy lejos del ambiente que le rodea. Como no tienen un sistema circulatorio, los nutrimentos pasan directamente del tracto digestivo a las células corporales. La cavidad digestiva tiene una estructura ramificada que llega a todas las partes del cuerpo, lo que permite que los nutrimentos ya digeridos se distribuyan entre las células adyacentes. La cavidad digestiva tiene solamente una abertura hacia el exterior, de forma que los desechos no digeridos salen por la misma abertura que sirve como boca.

Los gusanos planos tienen simetría bilateral, en vez de simetría radial (véase la figura 23-2). Esta configuración corporal y su cefalización correspondiente fomentan el movimiento activo. Los animales con simetría bilateral cefalizada poseen un extremo anterior, el cual es la primera parte del animal que tiene contacto con el entorno. En consecuencia, los órganos sensoriales están concentrados en la parte anterior del cuerpo, lo que aumenta la sensibilidad del animal para responder adecuadamente a cualquier estímulo (por ejemplo, ingerir alimento y retirarse cuando encuentra algún obstáculo).

Los gusanos planos se reproducen tanto sexual como asexualmente. Las formas que viven libremente se reproducen estrangulándose alrededor de la mitad de su cuerpo hasta que se dividen en dos mitades, cada una de las cuales regenera la parte que le falta. Todas las formas se pueden reproducir sexualmente; la mayoría son **hermafroditas**, es decir, poseen órganos sexuales masculinos y femeninos. Esta característica resulta de gran ventaja para las formas parásitas porque permite a cada gusano reproducirse por medio de la autofecundación, aun cuando sea el único individuo que vive en el cuerpo de su huésped.

Algunos gusanos planos parásitos pueden infectar a los humanos. Por ejemplo, las tenias o solitarias pueden infectar a las personas que comen carne de res o de puerco mal cocida, o pescado que haya sido infectado por estos gusanos. Las larvas forman estructuras latentes encapsuladas, llamadas *quistes,* en los músculos de estos animales. Los quistes eclosionan en el tracto digestivo humano, donde las tenias jóvenes se fijan al revestimiento intestinal y pueden crecer hasta alcanzar longitudes de más de 7 metros. Ahí absorben los nutrimentos digeridos directamente a través de su superficie

externa y a veces liberan paquetes de huevecillos que son expulsados en las heces del huésped. Si los cerdos, las vacas o los peces ingieren un alimento contaminado con heces humanas infectadas, los huevecillos eclosionan en el tracto digestivo del animal y liberan larvas que horadan los músculos y forman quistes, con lo cual prosigue el ciclo infeccioso (**FIGURA 23-10**).

Otro grupo de gusanos planos parásitos es el de los *trematodos* (duelas). De éstos, los de efectos más devastadores son los trematodos hepáticos (comunes en Asia) y los trematodos sanguíneos, como los que pertenecen al género *Schistosoma*, que causan la enfermedad llamada esquistosomiasis. Al igual que la mayoría de los parásitos, los trematodos tienen un ciclo vital complejo que incluye un huésped intermedio (un caracol en el caso del *Schistosoma*). Se estima que la esquistosomiasis, frecuente en África y en algunos países de América del Sur, afecta a 200 millones de personas en todo el mundo. Sus síntomas incluyen diarrea, anemia y un posible daño cerebral.

Los anélidos están formados por segmentos idénticos

Charles Darwin, quizá el más importante de todos los biólogos, dedicó mucho tiempo al estudio de las lombrices (gusanos de tierra). De hecho, escribió un libro completo acerca de ellas. Darwin estaba impresionado con la función que desem-

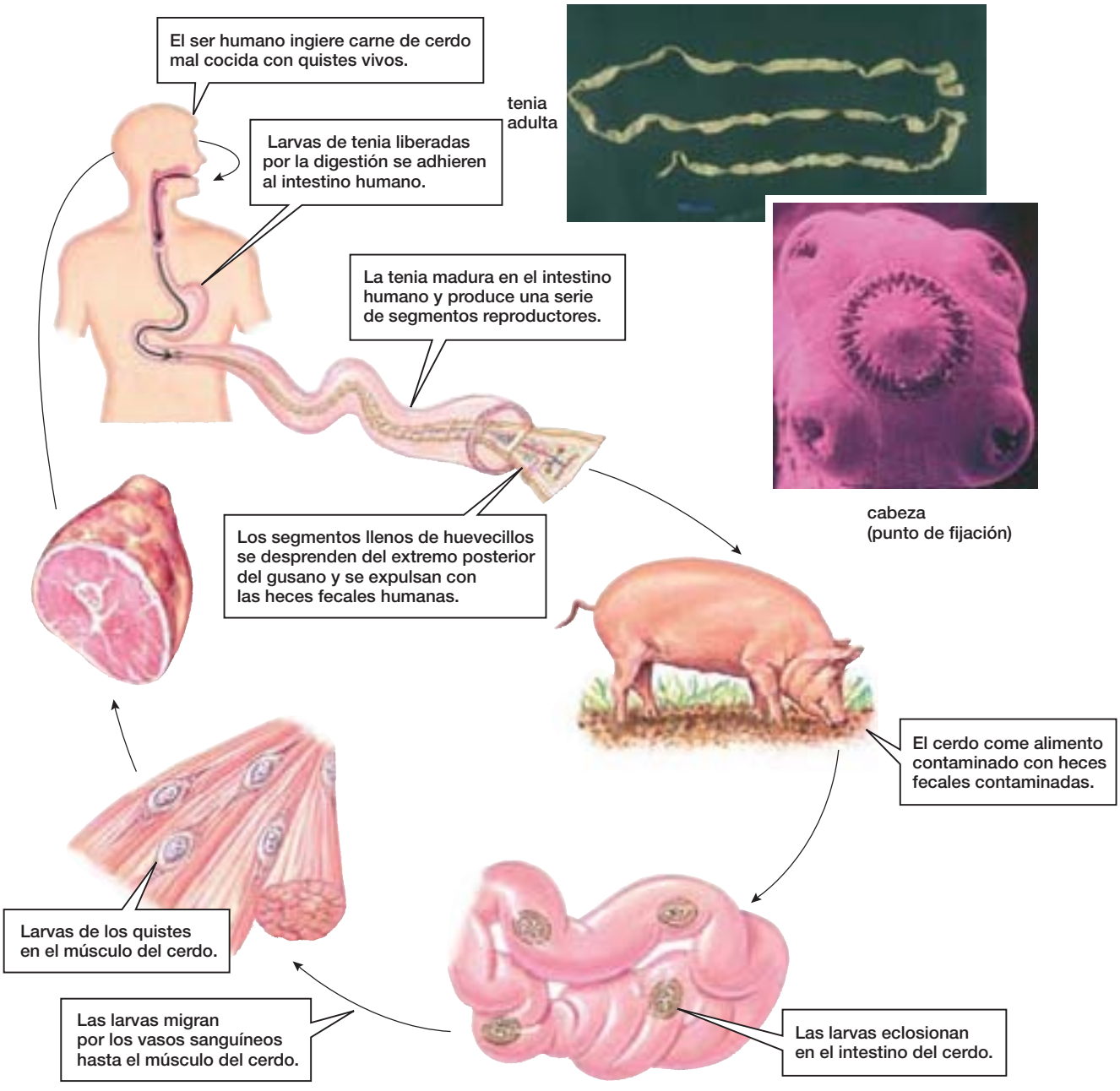

El ser humano ingiere carne de cerdo mal cocida con quistes vivos.
tenia adulta
Larvas de tenia liberadas por la digestión se adhieren al intestino humano.
La tenia madura en el intestino humano y produce una serie de segmentos reproductores.
cabeza (punto de fijación)
Los segmentos llenos de huevecillos se desprenden del extremo posterior del gusano y se expulsan con las heces fecales humanas.
El cerdo come alimento contaminado con heces fecales contaminadas.
Larvas de los quistes en el músculo del cerdo.
Las larvas migran por los vasos sanguíneos hasta el músculo del cerdo.
Las larvas eclosionan en el intestino del cerdo.

FIGURA 23-10 Ciclo vital de la tenia del cerdo doméstico
Cada unidad reproductora, o proglotidio, es una fábrica reproductora autosuficiente que incluye tanto órganos sexuales masculinos como femeninos.

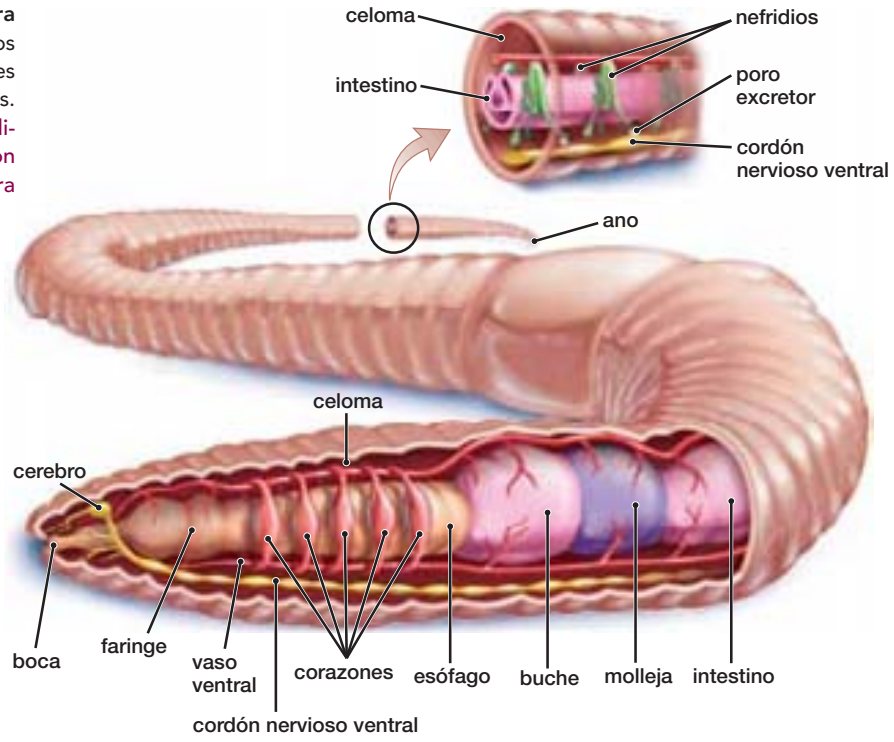


FIGURA 23-11 Un anélido, la lombriz de tierra
Este diagrama muestra una ampliación de los segmentos, muchos de los cuales son unidades similares repetidas, separadas por tabiques. PREGUNTA: ¿Qué ventaja tiene un sistema digestivo con dos aberturas en comparación con los sistemas digestivos con una sola abertura (como la de los gusanos planos)?

peñan en el mejoramiento de la fertilidad de los suelos. Más de un millón de lombrices pueden vivir en una hectárea de tierra, debajo de cuya superficie las lombrices hacen túneles y consumen y excretan partículas de tierra y materia orgánica. Estas actividades ayudan a lograr que el aire y el agua puedan moverse con facilidad a través del suelo y que la materia orgánica se mezcle continuamente con éste, creando así condiciones favorables para el crecimiento de las plantas. Desde el punto de vista de Darwin, la actividad de las lombrices ha tenido un efecto tan significativo en la agricultura que "quizá no existan otros animales que hayan jugado un papel tan importante en la historia del mundo".

Las lombrices son ejemplos de *anélidos* (filum Annelida), gusanos segmentados. Una característica prominente de los anélidos es la división del cuerpo en una serie de segmentos que se repiten. Por fuera, estos segmentos se observan como depresiones anulares de la superficie. En su interior, la mayoría de los segmentos contienen copias idénticas de nervios, estructuras excretoras y músculos. La **segmentación** es una ventaja para su locomoción, porque los compartimientos corporales, cada uno de los cuales está controlado por músculos independientes, son capaces de realizar colectivamente movimientos más complejos que si sólo tuvieran un conjunto de músculos para controlar el cuerpo completo.

Otra característica que diferencia a los anélidos de los gusanos planos es un verdadero celoma lleno de líquido que está entre la pared corporal y el tracto digestivo (véase la figura 23-3a). El líquido no compresible del celoma de muchos anélidos está confinado por los tabiques que separan los segmentos y sirven como **esqueleto hidrostático** distribuye gases y nutrimentos por todo el cuerpo. En los sistemas circulatorios cerrados (incluido el tuyo), la sangre permanece confinada en el corazón y en los vasos sanguíneos. En las lombrices, por ejemplo, la sangre con hemoglobina, que transporta oxígeno, es bombeada a través de vasos bien desarrollados por cinco pares de "corazones" (**FIGURA 23-11**). Estos corazones son en realidad segmentos cortos de vasos sanguíneos especializados que se contraen rítmicamente. La sangre es filtrada y los desechos son eliminados por los órganos excretores llamados *nefridios,* que se encuentran en muchos de los segmentos. Los nefridios se asemejan a los túbulos individuales del riñón de los vertebrados. El sistema nervioso de los anélidos se compone de un cerebro ganglionar simple, situado en la cabeza y una serie de pares de ganglios segmentarios que se repiten, unidos por un par de cordones nerviosos ventrales que recorren el cuerpo longitudinalmente. El sistema digestivo de los anélidos incluye un intestino que va desde la boca hasta el ano. Esta clase de tracto digestivo, con dos aberturas y una vía digestiva de una abertura, es mucho más eficiente que los sistemas digestivos de una abertura de los cnidarios y de los gusanos planos. La digestión de los anélidos ocurre en una serie de compartimientos, cada uno especializado en una fase del procesamiento del alimento (véase la figura 23-11).

La reproducción sexual es común entre los anélidos. Algunas especies son hermafroditas; otras tienen sexos separados. La fecundación puede ser externa o interna. La fecundación externa, en la cual los espermatozoides y los óvulos se liberan al ambiente, se encuentra principalmente en las especies que habitan en el agua. En la fecundación interna, dos individuos copulan y los espermatozoides son transferidos directamente de uno al otro. En las especies hermafroditas, la transferencia de espermatozoides puede ser mutua, es decir, cada individuo transfiere espermatozoides al otro. Además, algunos anélidos se pueden reproducir asexualmente, por lo común por medio

a)

b)

c)

FIGURA 23-12 Diversos anélidos
a) Un anélido poliqueto proyecta sus brillantes branquias en espiral desde un tubo adherido a la roca. Cuando las branquias se retraen, el tubo queda cubierto por el escobillón que se observa abajo a la derecha. ***b)*** Este diminuto poliqueto (visto aquí a través de un microscopio) vive entre las rocas a orillas del mar, cerca de la línea de las mareas. ***c)*** Esta sanguijuela, un anélido de agua dulce, muestra numerosos segmentos. La ventosa rodea su boca, lo que le permite adherirse a su presa. PREGUNTA: ¿Por qué resulta dañada una sanguijuela si se vierte sal sobre ella?

de la fragmentación en la cual el cuerpo se divide en dos partes, cada una de las cuales regenera la parte que falta.

Las 9000 especies del filum Annelida caen en uno de tres subgrupos principales: los *oligoquetos*, los *poliquetos* y *las sanguijuelas.* Los oligoquetos incluyen a las lombrices tan familiares y sus parientes. Los poliquetos habitan principalmente en el océano. Algunos poliquetos tienen pares de remos carnosos en casi todos sus segmentos, los cuales tienen la función de locomoción. Otros viven en tubos desde los cuales proyectan branquias plumosas que intercambian gases y también tamizan el agua para obtener partículas microscópicas de alimento (**FIGURA 23-12a, b**). Las sanguijuelas (**FIGURA 23-12c**

La mayoría de los moluscos tienen conchas

Si alguna vez has saboreado un tazón de sopa de almejas, una docena de ostras en su concha, o una vieira salteada, entonces estás en deuda con los *moluscos* (filum Mollusca). Los moluscos incluyen especies con una amplia variedad de estilos de vida, que van desde las formas pasivas que alcanzan la adultez viviendo en un solo sitio y filtrando microorganismos del agua, a los depredadores activos y voraces que habitan en el fondo de los mares. Los moluscos incluyen también a los animales invertebrados más grandes e inteligentes. Los moluscos son muy diversos, y por el número de especies que se conocen (50,000), se ubican en segundo lugar (aunque distante) sólo después de los artrópodos. Con excepción de algunos caracoles y babosas, los moluscos habitan en el agua.

Casi todos los moluscos protegen sus cuerpos con conchas duras de carbonato de calcio. Sin embargo, otros carecen de concha y huyen de los depredadores moviéndose suavemente o bien produciendo una sustancia de sabor muy desagradable. Los moluscos tienen un *manto*

ENLACES CON LA VIDA Ayudantes de cirujanos

Aunque los animales invertebrados causan o transmiten muchas enfermedades al ser humano, algunos hacen una importante contribución a la buena salud de la humanidad. Consideremos a las sanguijuelas, por ejemplo. Durante más de 2000 años, los curanderos empleaban estos anélidos parásitos para el tratamiento de casi todas las enfermedades o lesiones del ser humano. Durante buena parte de la historia de la medicina, el tratamiento con sanguijuelas se basaba en la esperanza de que estas criaturas chuparan la sangre "contaminada" que se creía era la causa principal de las enfermedades. Sin embargo, al descubrirse la causa verdadera de muchas enfermedades, declinó el empleo de las sanguijuelas en la práctica médica. Para el inicio del siglo XX, las sanguijuelas dejaron de formar parte del equipo de la medicina moderna y llegaron a ser el símbolo de la ignorancia de una época muy lejana. Sin embargo, en la actualidad el empleo de las sanguijuelas con fines médicos ha retornado de manera sorpresiva.

Actualmente las sanguijuelas se utilizan para tratar una complicación quirúrgica conocida como insuficiencia venosa. Esta complicación es especialmente común en la cirugía reconstructiva, como la reimplantación de un dedo lesionado o la reparación de un rostro desfigurado. En tales casos, los cirujanos con frecuencia encuentran dificultades para volver a conectar todas las venas que normalmente retiran la sangre de los tejidos. Con el tiempo, crecerán nuevas venas, pero mientras tanto, la sangre se acumula en el tejido reparado. A menos que se elimine el exceso de sangre, ésta formará coágulos que quitan oxígeno y nutrimientos al tejido cercano. Por fortuna, las sanguijuelas pueden ayudar en esto: se colocan en la parte infectada, y de inmediato se ponen a trabajar haciendo una pequeña incisión sin provocar dolor y chupan la sangre hasta llenar su estómago. Para ayudarse en su tarea de remoción de la sangre, la saliva de las sanguijuelas contiene una mezcla de sustancias químicas que hace que se dilaten los vasos sanguíneos, lo que evita la formación de coágulos. Aunque este compuesto químico de la saliva es una adaptación que ayuda a las sanguijuelas a consumir la sangre con mayor eficiencia, también ayuda al paciente porque acelera el flujo de sangre hacia el tejido dañado. De esta forma, las sanguijuelas brindan un tratamiento efectivo y sin dolor en los casos de insuficiencia venosa, por lo que han vuelto a adquirir importancia como ayudantes médicos para la humanidad.

Otro animal invertebrado que se utiliza en la práctica médica es la mosca azul, o mejor dicho, sus larvas conocidas comúnmente como gusanos (**FIGURA E23-1**). Estos gusanos de la mosca azul han probado ser eficaces para tratar heridas y úlceras del tejido que se está muriendo o que ya ha muerto. Si no se eliminan esos tejidos, pueden interferir con la cicatrización u originar infecciones. Tradicionalmente, los médicos se encargan de retirar el tejido muerto de las heridas por medio del bisturí, pero los gusanos ofrecen un tratamiento alternativo cada vez más común. En este tratamiento, se aplica a la herida un vendaje con gusanos estériles nacidos el mismo día de la aplicación. Los gusanos consumen el tejido muerto o por morir, secretando enzimas digestivas que no lesionan los tejidos ni los huesos sanos. Después de unos cuantos días, los gusanos crecen hasta adquirir el tamaño de una semilla de arroz, y luego se retiran. Este tratamiento se repite hasta que se limpia la herida.

FIGURA E23-1 Las larvas de la mosca azul pueden limpiar las heridas.

las especies con concha, se encarga de secretar esta última. Los moluscos tienen también un sistema circulatorio bien desarrollado, una característica que no se presenta en los anélidos: el **hemocele**, o cavidad sanguínea. La sangre se vacía dentro del hemocele, donde baña directamente los órganos internos. Este arreglo, conocido como **sistema circulatorio abierto**, también está presente en la mayoría de los artrópodos. El sistema nervioso, como el de los anélidos, consiste en ganglios conectados por medio de nervios, pero la mayoría de los ganglios se concentran en el cerebro. La reproducción es sexual, pero algunas especies tienen sexos separados, y otras son hermafroditas. Aunque los moluscos están enormemente diversificados, en la **FIGURA 23-13** se muestra un diagrama simplificado del plano corporal de un molusco.

Entre las muchas clases de moluscos, explicaremos con más detalle tres de ellas: los gasterópodos, bivalvos y cefalópodos.

Los gasterópodos tienen un pie que les permite reptar

Los caracoles y las babosas, conocidos en conjunto con el nombre de *gasterópodos*, reptan sobre un *pie* muscular, y muchos están protegidos por conchas de muy variadas formas y colores (**FIGURA 23-14a**); sin embargo, no todos los gasterópodos poseen concha. Por ejemplo, las babosas de mar carecen de concha, pero sus colores brillantes advierten a los posibles depredadores de que son venenosas y que tienen un sabor muy desagradable (**FIGURA 23-14b**).

Los gasterópodos se alimentan por medio de una *rádula*, una banda flexible de tejido cubierto de espinas con la que raspan algas de las rocas o sujetan plantas o presas más grandes (véase la figura 23-13). La mayoría de los caracoles respiran por medio de branquias, que por lo general están encerradas en una cavidad ubicada debajo de la concha. Los gases también se difunden con facilidad a través de la piel de casi todos los gasterópodos, y la mayoría de las babosas de mar dependen de esta modalidad de intercambio de gases. Las pocas especies de gasterópodos que viven en hábitat terrestres (incluidos los destructores caracoles y babosas de jardín) respiran por medio de un pulmón simple.

Los bivalvos se alimentan por filtración

Entre los *bivalvos* se incluyen vieiras, ostras, mejillones y almejas (**FIGURA 23-15**). Los miembros de esta clase no sólo aportan una exótica variedad a la dieta humana, sino que ade-

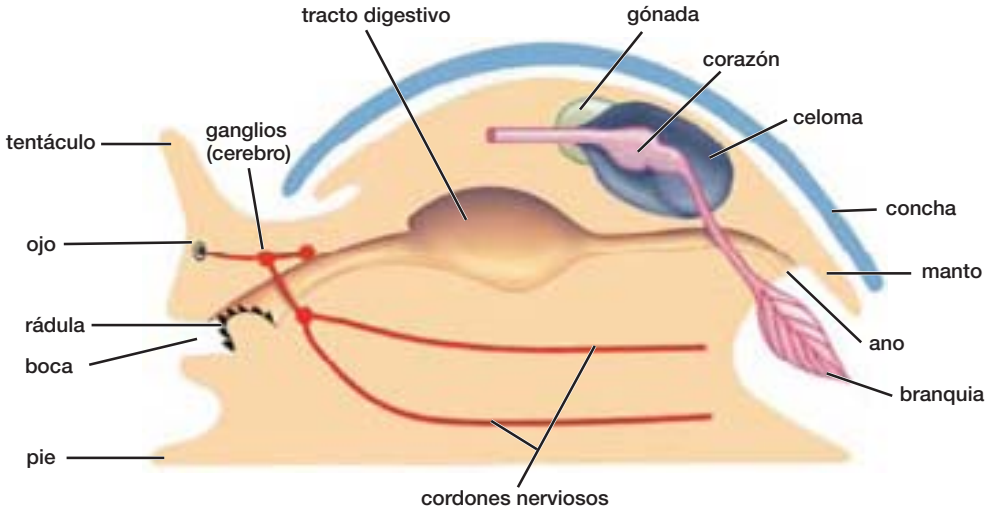


FIGURA 23-13 Forma general de un molusco
Plano corporal general de un molusco que muestra el manto, el pie, las branquias, la concha, la rádula y otras estructuras que se observan en la mayoría de las especies de moluscos (pero no en todas).

a) b)

FIGURA 23-14 Diversidad de los moluscos gasterópodos
a) El caracol arbóreo de Florida ostenta una concha con rayas de brillante colorido y ojos en la punta de pedúnculos que se retraen instantáneamente si se les toca. ***b)*** La babosa de mar de mantilla española se dispone a aparearse. Los brillantes colores de muchas babosas de mar advierten a los depredadores potenciales que su sabor es desagradable.

a) b)

FIGURA 23-15 Diversidad de los moluscos bivalvos
a) Esta vieira nadadora separa sus conchas unidas por una bisagra. La concha superior está cubierta de una esponja incrustada. ***b)*** Los mejillones se adhieren a las rocas en densos agregados que quedan al descubierto durante la marea baja. Se observan percebes blancos adheridos a las conchas de los mejillones y a la roca de los alrededores.

más son importantes miembros de la comunidad marina próxima a los litorales. Los bivalvos poseen dos conchas unidas por una bisagra flexible. Un músculo cierra bruscamente las dos conchas en respuesta al peligro; este músculo es lo que nos sirven cuando pedimos vieiras en un restaurante.

Las almejas utilizan un pie muscular para escarbar en la arena o en el lodo. En los mejillones, que viven adheridos a las rocas, el pie es más pequeño y ayuda a secretar hebras que anclan el animal a las rocas. Las vieiras carecen de pie y se desplazan mediante una especie de caprichosa propulsión a chorro que consiguen al batir sus conchas. Los bivalvos se alimentan por filtración y usan sus branquias como estructuras tanto respiratorias como de alimentación. El agua circula sobre las branquias, las cuales están cubiertas de una capa mucosa que atrapa las partículas microscópicas de alimento. La agitación de los cilios que recubren las branquias envía el alimento a la boca. Probablemente debido a que se alimentan por filtración y a que no se desplazan mucho, los bivalvos "perdieron la cabeza" en el curso de su evolución.

Los cefalópodos son depredadores marinos

Los *cefalópodos* incluyen los pulpos, los nautilos, las jibias (o sepias) y los calamares (**FIGURA 23-16**). El invertebrado más grande, el calamar gigante, pertenece a este grupo. Todos los cefalópodos son depredadores carnívoros y todos son marinos. En estos moluscos, el pie ha evolucionado en tentáculos junto con capacidades quimiosensoriales bien desarrolladas y ventosas con las que localizan y sujetan a sus presas. La presa sujetada por medio de los tentáculos es inmovilizada por un veneno paralizante que existe en la saliva, antes de que las mandíbulas con forma de picos la desgarren.

Los cefalópodos se desplazan con rapidez por medio de propulsión a chorro, la cual es generada lanzando agua con fuerza de la cavidad del manto. Los pulpos pueden recorrer el lecho marino utilizando sus tentáculos como si fueran múltiples patas ondulantes. Los movimientos rápidos y la vida activa de los pulpos son posibles gracias, en parte, a su sistema circulatorio cerrado. Los cefalópodos son los únicos moluscos con circulación cerrada, que permite transportar oxígeno y nutrimentos con mayor eficiencia que los sistemas circulatorios abiertos.

Los cefalópodos cuentan con cerebros y sistemas sensoriales altamente desarrollados. Los ojos de los cefalópodos rivalizan con los nuestros en complejidad y los superan en cuanto a la eficiencia del diseño. El cerebro de los cefalópodos, en especial el del pulpo, es excepcionalmente grande y complejo en comparación con el cerebro de otros invertebrados. Se encuentra encerrado en un estuche de cartílago parecido a un cráneo y dota al pulpo de capacidades de aprendizaje y memoria muy desarrolladas. En el laboratorio los pulpos aprenden rápidamente a asociar ciertos símbolos con el alimento y a abrir un frasco con tapa roscada para obtenerlo.

Los artrópodos son los animales que dominan la Tierra

En términos tanto de número de individuos como de número de especies, ningún otro filum animal se acerca a los *artrópodos* (filum Arthropoda), el cual incluye los insectos, arácnidos, miriápodos y crustáceos. Se ha descubierto alrededor de un millón de especies de artrópodos, y los científicos estiman que aún hay millones sin describir.

Todos los artrópodos tienen un **exoesqueleto**, es decir, un esqueleto externo que encierra al cuerpo del artrópodo como si fuera una armadura. El exoesqueleto, secretado por la *epidermis* (la capa externa de la piel), está formado principalmente de proteína y un polisacárido llamado *quitina.* Este esqueleto externo brinda protección contra los depredadores

a)

b)

c)

FIGURA 23-16 Diversidad de los moluscos cefalópodos

Un pulpo se arrastra con rapidez mediante sus ochos tentáculos con ventosas, y puede cambiar el color y la textura de su piel para confundirse con su entorno. En caso de una emergencia, este molusco retrocede impulsándose con el chorro que produce al contraer vigorosamente su manto. Los pulpos y los calamares emiten nubes de tinta de color púrpura oscuro para confundir a los depredadores que los persiguen. ***b)*** El calamar se desplaza exclusivamente contrayendo su manto para generar una propulsión a chorro que empuja al animal hacia atrás en el agua. ***c)*** El nautilo con celdas secreta una concha con celdas internas llenas de gas que le sirven para flotar. Observa sus ojos bien desarrollados y sus tentáculos para capturar presas.

FIGURA 23-17 El exoesqueleto permite los movimientos de precisión
Una araña comienza a envolver en seda al insecto capturado. Estas ágiles manipulaciones son posibles gracias al exoesqueleto y a los apéndices articulados que son característicos de los artrópodos.

y confiere a los artrópodos una agilidad mucho mayor en comparación con la de sus antepasados semejantes a los gusanos. El exoesqueleto es delgado y flexible en ciertas partes, lo que permite el movimiento de los pares de apéndices articulados. Mediante los apéndices duros pero flexibles y los puntos rígidos de fijación para los músculos, el exoesqueleto hace posible el vuelo del abejorro y las manipulaciones delicadas e intrincadas que la araña ejecuta al tejer su tela (**FIGURA 23-17**). Asimismo, el exoesqueleto contribuyó en alto grado a la invasión de hábitat terrestres por los artrópodos (éstos fueron los primeros animales terrestres; véase el capítulo 17) al brindar una cubierta impermeable para los tejidos húmedos y delicados, como los que se utilizan para el intercambio de gases.

Al igual que una armadura, el exoesqueleto de los artrópodos implica algunos problemas peculiares. En primer lugar, puesto que no puede expandirse a medida que el animal crece, periódicamente es necesario desechar, o **mudar**, el exoesqueleto para sustituirlo por uno más grande (**FIGURA 23-18**). La muda consume energía y deja al animal temporalmente vulnerable hasta que se endurece el nuevo exoesqueleto. (Los cangrejos de "caparazón blando" son simplemente cangrejos normales de "caparazón duro" atrapados durante el periodo de muda). El exoesqueleto también es pesado, y su peso aumenta de manera exponencial conforme el animal crece. No es simple coincidencia que los artrópodos más grandes sean crustáceos (cangrejos y langostas), cuyo hábitat acuático sostiene gran parte de su peso.

Los artrópodos están segmentados, pero sus segmentos tienden a ser pocos y especializados para desempeñar diferentes funciones como la percepción del ambiente, la alimentación y el movimiento (**FIGURA 23-19**). Por ejemplo, en los insectos las estructuras sensoriales y de alimentación se concentran en el segmento anterior, conocido como la *cabeza*, y las estructuras digestivas están confinadas en su mayoría en el *abdomen*, el segmento posterior del animal. Entre la cabeza y el abdomen está el *tórax*

FIGURA 23-18 Es necesario mudar el exoesqueleto periódicamente
Esta mantis religiosa (un insecto depredador) acaba de salir y cuelga junto al exoesqueleto (izquierda) que tuvo que mudar porque le resultaba pequeño.

tercambio de gases se lleva a cabo en las branquias. En los artrópodos terrestres el intercambio de gases se realiza en los pulmones (en los arácnidos) o en la *tráquea*, una red de tubos respiratorios angostos ramificados que se abren al ambiente y que penetran en todas las partes del cuerpo. La mayoría de los artrópodos tienen sistemas circulatorios abiertos, igual que los moluscos, en los cuales la sangre baña directamente los órganos del hemocele.

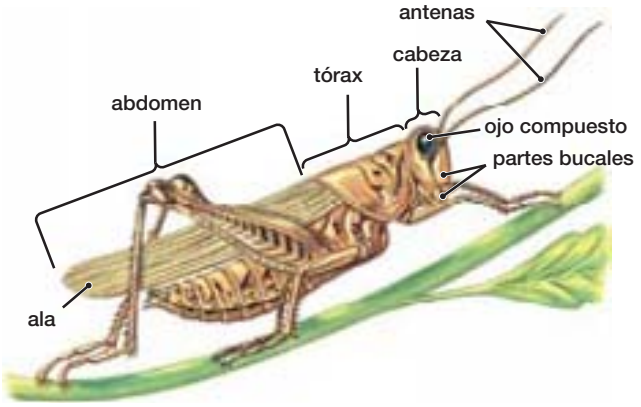


FIGURA 23-19 En los insectos los segmentos están fusionados y especializados
Los insectos, como este saltamontes, presentan fusión y especialización de segmentos corporales para formar una cabeza, un tórax y un abdomen definidos. Los segmentos son visibles en el abdomen, debajo de las alas.

FIGURA 23-20 Los artrópodos poseen ojos compuestos
Esta micrografía electrónica de barrido muestra el ojo compuesto de una mosca de la fruta. Los ojos compuestos consisten en un conjunto de elementos recolectores y sensores de luz cuya orientación brinda al artrópodo una vista panorámica del mundo. Los insectos tienen una razonable capacidad para formar imágenes y buena discriminación del color.

La mayoría de los artrópodos poseen un sistema sensorial bien desarrollado, incluidos los **ojos compuestos**, los cuales tienen múltiples detectores de luz (FIGURA 23-20), y sentidos táctiles y químicos agudos. El sistema nervioso de los artrópodos es similar en cuanto a organización al de los anélidos, aunque es más complejo; consta de un cerebro compuesto de ganglios fusionados y una serie de ganglios adicionales a lo largo del cuerpo que están vinculados por un cordón nervioso ventral. La capacidad de realizar movimientos finamente coordinados, aunada a destrezas sensoriales refinadas y a un sistema nervioso bien desarrollado, ha hecho posible la evolución de comportamientos complejos.

Los insectos son los únicos invertebrados capaces de volar

El número de especies descritas de *insectos*

FIGURA 23-21). Los insectos tienen un solo par de antenas y tres pares de patas, normalmente complementadas con dos pares de alas. La capacidad de volar de los insectos los distingue de todos los demás invertebrados y ha contribuido a su enorme éxito (véase la figura 23-21c). Como podrá atestiguar cualquiera que haya perseguido infructuosamente a una mosca, el vuelo le ayuda a escapar de los depredadores. Esta facultad también permite al insecto buscar el alimento que se encuentra muy disperso. Se ha seguido el rastro de enjambres de langostas (véase la figura 23-21d) que han podido viajar 320 kilómetros diariamente en busca de alimento; los investigadores siguieron la pista de un enjambre durante un recorrido que totalizó casi 4800 kilómetros. El vuelo exige un intercambio de gases rápido y eficiente que los insectos consiguen por medio de tráqueas.

Durante su desarrollo, los insectos sufren una corporal, de la juvenil a la adulta. En los insectos con metamorfosis completa, la etapa inmadura, llamada **larva**, tiene apariencia de gusano (por ejemplo, el gusano de la mosca doméstica o la oruga de una polilla o de una mariposa; véase la figura 23-21e). La larva sale de un huevecillo, crece comiendo con voracidad, muda su exoesqueleto varias veces y luego se convierte en una forma que no se alimenta llamada **pupa**. Encerrada en una cubierta exterior, la pupa sufre un cambio radical de su cuerpo para surgir en su forma adulta con alas. Los adultos se aparean y depositan los huevecillos, con lo cual prosigue el ciclo. La metamorfosis puede incluir un cambio de dieta además del cambio de forma, con lo cual se elimina la competencia por el alimento entre adultos y jóvenes, y en ciertos casos permite al insecto explotar diferentes alimentos cuando son más abundantes. Por ejemplo, una oruga que se alimenta de brotes verdes en la primavera se transforma en una mariposa que chupa néctar de las flores que se abren en el verano. Ciertos insectos sufren una metamorfosis gradual (llamada metamorfosis incompleta); las formas juveniles tienen algún parecido con los adultos y después adquieren poco a poco más rasgos de adulto a medida que crecen y mudan.

Los biólogos clasifican esta asombrosa diversidad de insectos en varias docenas de órdenes, de los cuales describiremos aquí tres de los más grandes.

Orden Lepidoptera. Mariposas y polillas

Éste es quizá el grupo de insectos más llamativo y mejor estudiado de todos. Las alas de hermosos diseños brillantes y coloridos, a veces iridiscentes, de muchas especies de mariposas y polillas se deben a los pigmentos y a las estructuras que refractan la luz que nacen de las escamas que cubren las alas de todos los miembros de este grupo. (Quizá habrás notado que las escamas son una especie de polvo que se pega en la mano cuando sujetas a una mariposa o una polilla). Las mariposas vuelan principalmente durante el día, y las polillas durante la noche (aunque hay excepciones a esta regla general, como la polilla esfinge parecida al colibrí, a la que a menudo se ve alimentándose de flores durante el día). La evolución de las mariposas y polillas se ha vinculado estrechamente con la evolución de las plantas con flores. Las mariposas y polillas, en todas las etapas de su vida, se alimentan casi exclusivamente de plantas con flor. Por su parte, muchas especies de estas plantas dependen de las mariposas y polillas para su polinización.

Orden Hymenoptera. Abejas, hormigas y avispas

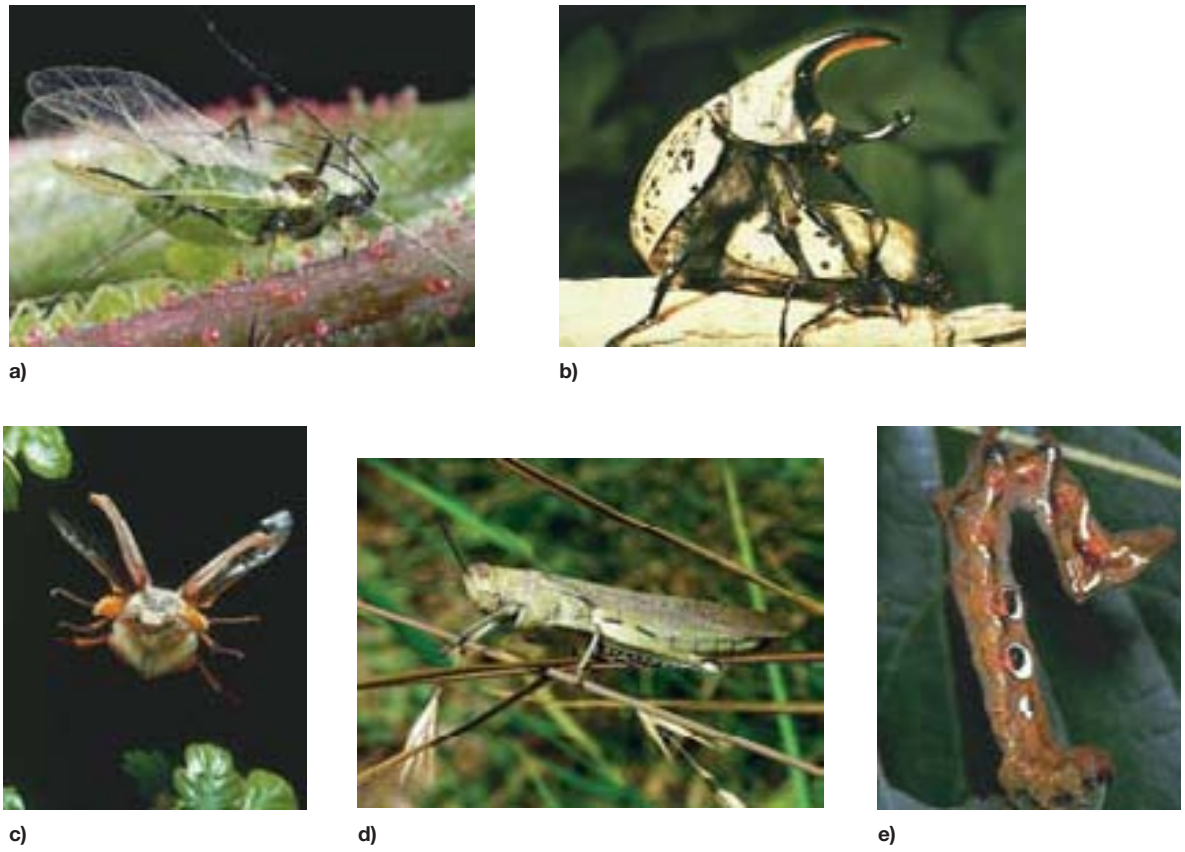


FIGURA 23-21 Diversidad de los insectos
a) El áfido de la rosa chupa el jugo de las plantas rico en azúcar. ***b)*** Apareamiento de dos escarabajos Hércules. Sólo el macho tiene "cuernos" grandes. ***c)*** Un escarabajo de junio exhibe sus dos pares de alas mientras se prepara para aterrizar. Las alas exteriores protegen el abdomen y las alas interiores, que son relativamente delgadas y frágiles. ***d)*** Los insectos como esta langosta causan grandes estragos tanto en los cultivos como en la vegetación natural. ***e)*** Las orugas son formas larvarias de palomillas o mariposas. Esta oruga de la palomilla australiana chupadora de frutos ostenta dibujos que semejan grandes manchas oculares y ahuyentan a los depredadores potenciales que las toman por ojos de un animal grande.

La conducta social de algunas especies de hormigas y abejas es extraordinariamente intrincada. Tales especies forman colonias muy grandes con una organización compleja en la cual los individuos se especializan en tareas particulares como recolección de alimentos, defensa, reproducción y crianza de las larvas. La organización y división del trabajo en estas sociedades de insectos requiere de niveles de comunicación y aprendizaje comparables con los de los vertebrados. Las notables tareas sociales que realizan estos insectos incluyen la manufactura y el almacenamiento del alimento (miel) en el caso de las abejas, y la "labor agrícola" de las especies de hormigas que cultivan hongos en cámaras subterráneas u "ordeñan" a pulgones al hacer que secreten un líquido nutritivo.

Orden Coleoptera. Escarabajos

granos y el escarabajo japonés. Sin embargo, algunos otros, como el escarabajo mariquita, son depredadores que se emplean para controlar las pestes de insectos.

Entre las muchas fascinantes adaptaciones de los escarabajos, una de las más impresionantes se encuentra en el escarabajo bombardero. Esta especie se defiende de las hormigas y otros enemigos lanzando un chisguete tóxico desde una estructura en forma de boquilla rociadora ubicada en el extremo del abdomen. El escarabajo también es capaz de apuntar con precisión este chisguete, el cual sale con una fuerza explosiva a una temperatura superior a los 93°C. El escarabajo puede llevar esta arma con seguridad porque no está presente de forma permanente en el cuerpo del animal, sino que la fabrica rápidamente cuando la necesita, al mezclar dos sustancias que almacena en dos glándulas independientes. Cada una de estas sustancias es inofensiva, pero cuando se mezclan, forman un líquido hirviente muy cáustico.

La mayoría de los arácnidos son depredadores carnívoros

Los *arácnidos* comprenden las arañas, los ácaros, las garrapatas y los escorpiones (FIGURA 23-22

a)

b)

c)

FIGURA 23-22 Diversidad de los arácnidos
a) La tarántula es una de las arañas más grandes, pero es relativamente inofensiva. ***b)*** Los escorpiones que habitan en climas cálidos, como el de los desiertos del suroeste de Estados Unidos, paralizan a su presa con el veneno del aguijón que tienen en la punta del abdomen. Unas pocas especies hacen daño a los seres humanos. ***c)*** Dos garrapatas antes (izquierda) y después (derecha) de alimentarse de sangre. El exoesqueleto desinflado es flexible y está plegado, lo que permite al animal hincharse grotescamente cuando se alimenta.

funciones, como tejer la telaraña para atrapar a las presas, envolverlas e inmovilizarlas, construir refugios protectores, hacer capullos para sus huevecillos, así como para fabricar "cables de arrastre" que conectan a la araña con su tela u otra superficie para sostener su cuerpo si llega a caerse. Cada una de estas funciones requiere de la seda pero con diferentes propiedades, y la mayoría de las arañas fabrican diferentes clases de seda. La seda de la araña es una fibra asombrosamente ligera, resistente y elástica. La seda del llamado "cable de arrastre" es tan fuerte o más que un alambre de acero del mismo calibre, y sin embargo es tan elástica como el hule. Los ingenieros químicos han estado tratando durante mucho tiempo de desarrollar una fibra que incorpore esta combinación de resistencia y elasticidad. A pesar de los estudios cuidadosos realizados sobre la estructura de la seda de la araña, el hombre no ha podido fabricar con éxito ninguna sustancia que presente las características de tal fibra. Algunos investigadores han aplicado en este problema las técnicas de la biotecnología, insertando en el laboratorio los genes de la araña que codifican las proteínas de la seda en células de mamíferos o de bacterias. Ellos esperan que se pueda inducir a las células a que produzcan la seda de araña.

Los miriápodos tienen muchas patas

Los *miriápodos* incluyen los ciempiés y milpiés, cuya característica más prominente es su abundancia de extremidades (**FIGURA 23-23**

FIGURA 23-23 Diversidad de los miriápodos
a) Los ciempiés y ***b***) los milpiés son artrópodos nocturnos comunes. Cada segmento del cuerpo de un ciempiés tiene un par de extremidades, mientras que cada segmento de un milpiés tiene dos pares.

extremidades, ya que una especie típica tiene alrededor de 70, aunque muchas especies tienen menos. Tanto los ciempiés como los milpiés tienen un par de antenas. Las extremidades y antenas de los ciempiés son más largas y más delicadas que las de los milpiés. Los miriápodos tienen ojos muy simples que detectan la luz y la oscuridad, pero no forman imágenes. En algunas especies, el número de ojos es elevado y puede llegar hasta 200. Los miriápodos respiran por medio de la tráquea.

Los miriápodos habitan exclusivamente en entornos terrestres y viven principalmente en la tierra, en la hojarasca o debajo de troncos de árboles y piedras. Los ciempiés por lo general son carnívoros, capturan su alimento (en su mayoría otros artrópodos) con sus extremidades delanteras, las cuales están modificadas como garras filosas que inyectan veneno a la víctima. Las picaduras de los ciempiés grandes son dolorosas para los humanos. En contraste, la mayoría de los milpiés no son depredadores, pues se alimentan de vegetación en descomposición y detritus. Cuando se les ataca, muchos milpiés se defienden secretando un líquido de olor y sabor muy desagradables.

Casi todos los crustáceos son acuáticos

Los *crustáceos,* que incluyen cangrejos, langostinos, langostas, camarones y percebes, constituyen la única clase de artrópodos cuyos integrantes viven principalmente en el agua (**FIGURA 23-24**). Los crustáceos fluctúan en cuanto al tamaño desde los maxilópodos microscópicos, que habitan en los espacios que dejan entre sí los granos de arena, hasta el más grande de todos los artrópodos, el cangrejo japonés, con patas que miden casi 4 metros de extremo a extremo. Los crustáceos tie-

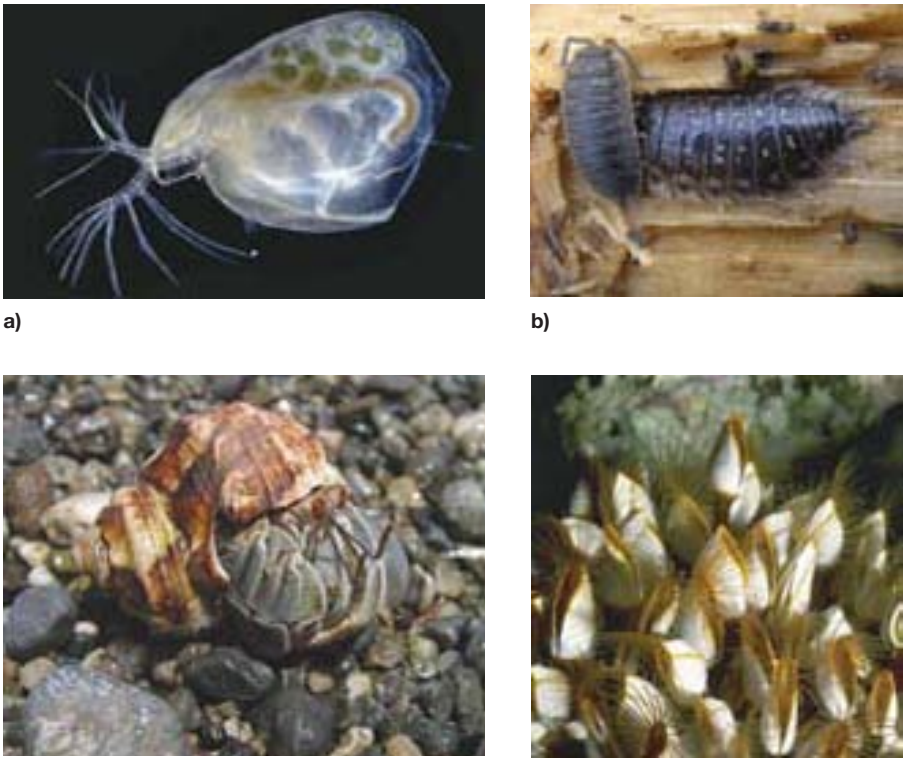


FIGURA 23-24 Diversidad de los crustáceos
a) La microscópica pulga de agua es común en los estanques de agua dulce. Observa los huevecillos que se desarrollan dentro del cuerpo. ***b***) La cochinilla, que habita en lugares húmedos y oscuros, por ejemplo, debajo de las piedras, hojas y troncos en descomposición, es uno de los pocos crustáceos que han logrado invadir la tierra con éxito. ***c***) El cangrejo ermitaño protege su blando abdomen ocupando una concha de caracol abandonada. ***d***) El percebe cuello de ganso se vale de un tallo resistente y flexible para anclarse a las rocas, botes o incluso animales como las ballenas. Otros tipos de percebes se adhieren mediante conchas que parecen volcanes en miniatura (véase la figura 23-15b). Los primeros naturalistas pensaron que los percebes eran moluscos hasta que observaron sus patas articuladas (que aquí se observan extendidas en el agua).

nen dos pares de antenas sensoriales, pero el resto de sus apéndices varían considerablemente en cuanto a forma y número, dependiendo del hábitat y modo de vida de la especie. La mayoría de los crustáceos tienen ojos compuestos parecidos a los de los insectos, y casi todos respiran por medio de branquias.

Los gusanos redondos abundan y en su mayoría son diminutos

Aunque por lo general, y felizmente, no nos damos cuenta de su presencia, los *gusanos redondos* (filum Nematoda) están en casi todas partes. Los gusanos redondos, a los que también se conoce como *nematodos*, han colonizado casi todos los hábitat del planeta y desempeñan un importante papel en la descomposición de la materia orgánica. Estos gusanos son extraordinariamente numerosos; una sola manzana podrida puede contener hasta 100,000 nematodos y miles de millones de ellos prosperan en cada hectárea de terreno fértil. Asimismo, casi todas las especies vegetales y animales brindan alojamiento a varias especies de nematodos parásitos.

Además de ser abundantes y omnipresentes, los nematodos son variados. Aunque sólo se ha dado nombre a alrededor de 12,000 especies de gusanos redondos, podrían existir hasta 500,000. La mayoría de ellas son microscópicas, como las que se muestran en la **FIGURA 23-25**, aunque algunas formas de nematodos parásitos alcanzan hasta un metro de largo.

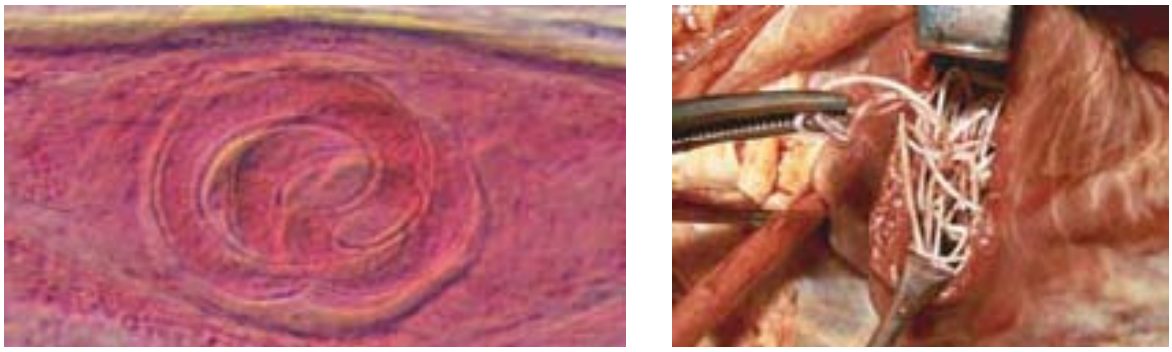
Los nematodos tienen un arreglo corporal bastante sencillo, con un intestino tubular y un seudoceloma lleno de líquido que rodea a los órganos y forma un esqueleto hidrostático. Una resistente cutícula inanimada y flexible encierra y protege el delgado cuerpo alargado, que muda en forma periódica. La muda de los gusanos redondos revela que comparten una herencia evolutiva con los artrópodos y otros fila de ecdysozoos. Los órganos sensoriales de la cabeza transmiten información a un "cerebro" simple, compuesto de un anillo nervioso.

Al igual que los gusanos planos, los nematodos carecen de sistemas circulatorio y respiratorio. Puesto que la mayoría de los nematodos son extremadamente delgados y consumen muy poca energía, la difusión basta para el intercambio de gases y la distribución de nutrimentos. Casi todos los nematodos se reproducen sexualmente, y los sexos están separados: el macho (que normalmente es más pequeño) fecunda a la hembra introduciendo espermatozoides en el cuerpo de ésta.

Durante nuestra vida, es probable que nos parasite alguna de las 50 especies de gusanos redondos que infectan a los humanos. La mayoría de estos gusanos son relativamente inofensivos, pero existen excepciones importantes. Por ejemplo, las larvas del anquilosoma presentes en el suelo pueden introducirse por los pies humanos, pasar al torrente sanguíneo y llegar al intestino, donde provocan un sangrado continuo. Otro nematodo parásito peligroso, la *Trichinella*, causa la enfermedad llamada triquinosis. Los gusanos *Trichinella* pueden infectar a la gente que ingiere carne de cerdo mal cocida, la cual puede contener hasta 15,000 quistes larvarios por gramo (**FIGURA 23-26a**). Los quistes eclosionan en el tracto digestivo humano e invaden los vasos sanguíneos y los músculos, provocando hemorragias y daño muscular.

Los nematodos parásitos también representan un peligro para los animales domésticos. Los perros, por ejemplo, son susceptibles a la lombriz del corazón que se transmite por los mosquitos (**FIGURA 23-26b**). En el sur de Estados Unidos, y cada vez más en otras partes de ese país, la lombriz del corazón representa una grave amenaza para la salud de las mascotas sin protección.

FIGURA 23-25 Un nematodo de agua dulce



a) b)

FIGURA 23-26 Algunos nematodos parásitos
a) Larva del gusano *Trichinella* enquistada en el tejido muscular de un cerdo, donde puede vivir hasta 20 años. ***b)*** Lombrices del corazón adultas en el corazón de un perro. Las formas juveniles entran en el torrente sanguíneo, donde pueden ser ingeridas por los mosquitos y transmitidas a otro perro por la picadura de un mosquito infectado.

Los equinodermos tienen un esqueleto de carbonato de calcio

Los *equinodermos* (filum Echinodermata) se encuentran solamente en el ambiente marino, y sus nombres comunes tienden a evocar los hábitat salados: dólares de arena, erizos de mar, estrellas de mar, pepinos de mar y lirios marinos (**FIGURA 23-27**). El nombre "equinodermo" (del griego, "piel de puerco espín") se relaciona con las espinas o protuberancias que sobresalen de la piel de la mayoría de los equinodermos. Estas espinas están especialmente bien desarrolladas en los erizos de mar y son mucho más pequeñas en las estrellas de mar y en los pepinos de mar. Las espinas y protuberancias de los equinodermos son en realidad prolongaciones de un **endoesqueleto** (esqueleto interno) formado de placas de carbonato de calcio que están debajo de la piel externa.

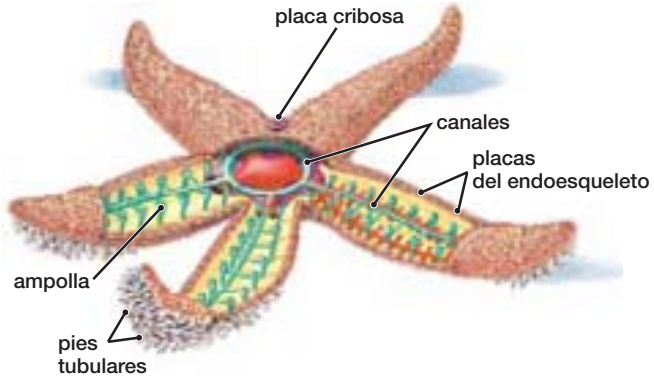
Los equinodermos muestran desarrollo de deuterostoma y están ligados por una ascendencia común con los demás fila de deuterostomados, incluidos los cordados que se describen más adelante. Los deuterostomados constituyen un grupo de ramas del árbol evolutivo mayor de los animales de simetría bilateral, pero en los equinodermos ésta se expresa sólo en los embriones y en las larvas que nadan libremente. Un equinodermo adulto, en cambio, tiene simetría radial y carece de cabeza. Esta ausencia de cefalización es congruente con la existencia de ritmo lento o sésil de los equinodermos. En su mayoría, los equinodermos se mueven con gran lentitud mientras se alimentan de algas o pequeñas partículas que tamizan de la arena o del agua. Algunos equinodermos son depredadores "de cámara lenta". Por ejemplo, las estrellas de mar persiguen a las presas que se desplazan más lentamente que ellas, como los moluscos bivalvos.

Los equinodermos se desplazan sobre numerosos y diminutos *pies tubulares,* unas delicadas protuberancias cilíndricas que se extienden a partir de la superficie inferior del cuerpo y terminan en una ventosa. Los pies tubulares son parte de un componente exclusivo de los equinodermos, el *sistema vascular acuoso*, que interviene en la locomoción, la respiración y la captura de alimento (**FIGURA 23-28**). El agua de mar ingresa por una abertura (la *placa cribosa*) de la superficie superior del animal y pasa por un canal circular central del cual parten varios canales radiales. Estos canales llevan agua a los pies tubulares, cada uno de los cuales está controlado por un bulbo exprimidor muscular. La contracción de este bulbo fuerza la entrada de agua en el pie tubular provocando que éste se extienda. La ventosa se puede comprimir contra el lecho marino o algún objeto comestible, al cual se adhiere firmemente hasta que se libera la presión.

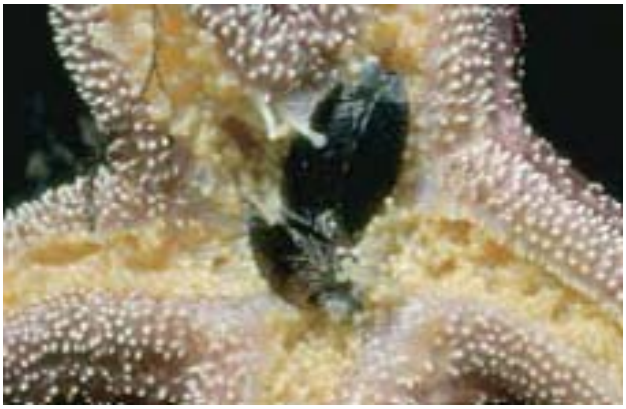
Los equinodermos tienen un sistema nervioso relativamente simple, sin cerebro definido. Sus movimientos son

a) b) c)

FIGURA 23-27 Diversidad de los equinodermos
a) Un pepino de mar se alimenta de desechos que encuentra en la arena. ***b)*** Las espinas del erizo de mar son en realidad extensiones del esqueleto interno.



a)



b)

FIGURA 23-28 Sistema vascular acuoso de los equinodermos
a) La presión cambiante dentro de sistema vascular lleno de agua de mar extiende o contrae los pies tubulares. ***b)*** La estrella de mar suele alimentarse de moluscos como este mejillón. Para alimentarse, la estrella de mar adhiere muchos pies tubulares a las conchas del mejillón y tira de ellos fuertemente. Después, la estrella de mar voltea de adentro hacia fuera el delicado tejido de su estómago, extendiéndolo a través de su boca ventral situada en el centro. Una abertura de las conchas del mejillón de menos de un milímetro es suficiente para que el estómago pueda comenzar a entrar. Una vez que lo consigue, el tejido estomacal secreta enzimas digestivas que debilitan al molusco, haciendo que se abra aún más. El alimento parcialmente digerido es transportado a la parte superior del estómago, donde se completa la digestión.

coordinados sin mucha precisión por un sistema consistente en un anillo nervioso que circunda el esófago, nervios radiales hacia el resto del cuerpo y una red nerviosa a través de la epidermis. En las estrellas de mar, unos receptores simples de luz y sustancias químicas se concentran en las puntas de los brazos y hay células sensoriales dispersas por toda la piel. En algunas especies de estrellas de mar, los receptores de luz están asociados con lentes diminutos, más pequeños que el grosor del cabello humano, que captan la luz y la enfocan hacia receptores. La calidad óptica de estas "microlentes" es excelente, muy superior a cualquier otra lente del mismo tamaño fabricada por el hombre.

Los equinodermos carecen de sistema circulatorio, aunque el movimiento del líquido de su bien desarrollado celoma cumple esta función. El intercambio de gases tiene lugar a través de los pies tubulares y, en ciertas formas, mediante numerosas y pequeñísimas "agallas cutáneas" que se proyectan a través de la epidermis. Casi todas las especies tienen sexos separados y se reproducen liberando espermatozoides y óvulos en el agua, donde se lleva a cabo la fecundación.

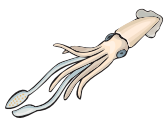
Muchos equinodermos tienen la facultad de regenerar partes corporales que han perdido, y esta capacidad de regeneración es especialmente notable en las estrellas de mar. De hecho, un solo brazo de estrella de mar es capaz de transformarse en un animal completo, siempre y cuando esté unido a un fragmento del cuerpo central. Cuando esta facultad aún no era ampliamente conocida, un grupo de pescadores intentó eliminar las estrellas de mar que atacaban los criaderos de mejillones partiéndolas en pedazos y devolviendo éstos al mar. Por supuesto, su estrategia resultó contraproducente.

Los cordados incluyen a los vertebrados

El filum Chordata, que abarca a los animales vertebrados, incluye también unos cuantos grupos de invertebrados, como los tunicados y los anfioxos. Explicaremos estos invertebrados cordados y sus parientes en el capítulo 24.

OTRO VISTAZO AL ESTUDIO DE CASO

BÚSQUEDA DE UN MONSTRUO MARINO



La búsqueda emprendida por Clyde Roper de un calamar gigante le condujo a organizar tres importantes expediciones. La primera de ellas la llevó a cabo en las aguas de las islas Azores en el Atlántico. Puesto que los cachalotes cazan a los calamares gigantes, Roper pensó que aquellos le conducirían al hábitat de los calamares. Para comprobar esta idea, él y su equipo fijaron cámaras de video en los cachalotes, lo que permitiría a los científicos observar lo que los cachalotes veían. Estas cámaras revelaron una gran cantidad de nueva información acerca del comportamiento de los cachalotes, pero por desgracia no había rastro de ningún calamar gigante.

La siguiente expedición de Roper se llevó a cabo en el cañón Kaikoura, un zona de aguas muy profundas (1000 metros) frente a las costas de Nueva Zelanda. Los científicos escogieron este lugar porque los botes de pesca habían capturado recientemente varios calamares gigantes en los alrededores. Las cámaras se colocaron de nuevo en los cachalotes; pero esta vez las cámaras móviles se complementaron con una cámara fija a la que le colocaron carnada y un pequeño submarino controlado por medios electrónicos. Sin embargo, tampoco esta gran inversión de tiempo, dinero y equipo permitió avistar calamares gigantes.

Unos cuantos años después, Roper formó un equipo de científicos y regresaron al cañón Kaikoura. En esta ocasión, el grupo pudo utilizar el Deep Rover, un submarino para un solo tripulante, con el fin de observar a profundidades de hasta 670 metros.

Los científicos emplearon el Deep Rover para explorar el cañón y seguir a los cachalotes con la esperanza de que les guiaran al hábitat del calamar gigante. Por desgracia, esto resultó otro fracaso porque los científicos no pudieron encontrar ningún calamar gigante.

Aunque Roper ha proseguido con su búsqueda del calamar gigante con una insistencia extraordinaria, no es el único en tratar de darle aunque sea un vistazo a esta criatura. Otros equipos de investigadores han estado organizando expediciones para localizar al calamar gigante y fue uno de estos grupos el que finalmente pudo obtener la primera (y hasta hoy la única) grabación del calamar gigante en vivo. Los investigadores, trabajando fuera de las costas de Japón, colocaron una cámara de video en una larga línea de pesca con una carnada en la punta. Durante muchas horas arrastraron la línea de pesca por el agua a una profundidad de 900 metros, y finalmente tuvieron su recompensa con unas imágenes del calamar gigante que había atacado a la carnada (**FIGURA 23-29**).

Piensa en esto Steve O'Shea, otro científico interesado en el calamar gigante, capturó a algunos calamares jóvenes en 2002. Estos pequeños animales, de tan sólo unos pocos milímetros de largo, sobrevivieron en cautiverio durante unas cuantas horas, pero su identidad como calamares gigantes se confirmó al comparar su DNA con el de los especímenes adultos preservados. O'Shea cree que con más investigación y experiencia, aprenderá a criar estos jóvenes ejemplares hasta que lleguen a la adultez. Puesto que los fondos destinados a las investigaciones son limitados, ¿cuál enfoque es el mejor? ¿Aprenderíamos más viendo al calamar gigante en su estado natural en las profundidades de los océanos, o capturando a calamares pequeños en la superficie de los mares para criarlos en el laboratorio?

FIGURA 23-29 Un calamar gigante se acerca a la línea de pesca con la carnada.

REPASO DEL CAPÍTULO

RESUMEN DE CONCEPTOS CLAVE

23.1 ¿Cuáles son las principales características de los animales?
Los animales son organismos multicelulares y heterótrofos, que se reproducen sexualmente. La mayoría de ellos perciben y reaccionan rápidamente a los estímulos ambientales y tienen motilidad en cierta etapa de su vida. Sus células carecen de pared celular.

23.2 ¿Qué características anatómicas marcan los puntos de bifurcación en el árbol evolutivo de los animales?
Los animales primitivos no tenían tejidos, una característica que conservan las actuales esponjas. Todos los demás animales modernos tienen tejidos. Los animales con tejidos pueden dividirse en grupos con simetría radial y con simetría bilateral. Durante el desarrollo embrionario, los animales de simetría radial tienen dos capas germinales; los animales de simetría bilateral tienen tres. Los animales de simetría bilateral también tienden a concentrar sus órganos sensoriales y grupos de neuronas en la cabeza, un proceso llamado *cefalización*. Los fila bilaterales se dividen en dos grupos principales, uno de los cuales presenta el desarrollo de protostoma, y el otro experimenta el desarrollo de deuterostoma. El filum de los protostomados, a la vez, se divide en ecdisozoos y lofotrocozoos. Algunos fila de animales de simetría bilateral carecen de cavidades corporales, pero la mayoría de ellos tienen seudocelomas o celomas verdaderos.

Web tutorial 23.1 La arquitectura de los animales

23.3 ¿Cuáles son los principales fila de animales?
Los cuerpos de las esponjas (filum Porifera) son típicamente sésiles y de forma irregular . Las esponjas tienen relativamente pocos tipos de células. Las esponjas poseen relativamente pocos tipos de células. A pesar de la división del trabajo entre los tipos de células, hay poca coordinación de la actividad. Las esponjas carecen de músculos y de nervios necesarios para la coordinación del movimiento, y la digestión tiene lugar exclusivamente dentro de las células individuales.

Las hidras, anémonas y medusas (filum Cnidaria) tienen tejidos. Una sencilla red de células nerviosas dirige la actividad de las células contráctiles, lo que permite la coordinación de los movimientos. La digestión es extracelular y tiene lugar en una cavidad central gastrovascular con una sola abertura. Los cnidarios muestran simetría radial, una adaptación tanto a la vida de flotación libre de la medusa y como a la existencia sedentaria del pólipo.

Los gusanos planos (filum Platyhelminthes) tienen una cabeza con órganos sensoriales y un cerebro sencillo. Un sistema de canales que forma una red a través del cuerpo ayuda a la excreción. Los gusanos planos carecen de cavidad corporal.

Los gusanos segmentados (filum Annelida) son los más complejos de los gusanos, con un sistema circulatorio cerrado bien desarrollado y órganos excretores que se asemejan a la unidad básica del riñón de los vertebrados. Los gusanos segmentados tienen un sistema digestivo de compartimientos, como el de los vertebrados, que procesan el alimento en secuencia. Los anélidos tienen también un celoma verdadero, es decir, un espacio lleno de líquido, entre la pared corporal y los órganos internos.

Los caracoles, las almejas y los calamares (filum Mollusca) carecen de esqueleto; algunas formas protegen el suave y húmedo cuerpo muscular con una sola concha (muchos gasterópodos y pocos cefalópodos) o con un par de conchas con bisagra (bivalvas). La carencia de una cubierta exterior impermeable limita a este filum a los hábitat acuáticos y terrestres húmedos. Aunque el cuerpo de los gasterópodos y los bivalvos limita la complejidad de su

comportamiento, los tentáculos de los cefalópodos son capaces de controlar con precisión los movimientos. El pulpo posee un cerebro más complejo y una capacidad de aprendizaje más desarrollada que cualquier otro invertebrado.

Los artrópodos, insectos, arácnidos, milpiés, ciempiés y crustáceos (filum Arthropoda) son los organismos más diversos y abundantes sobre la Tierra. Han invadido casi cada hábitat terrestre y acuático disponible. Sus apéndices articulados y los sistemas nerviosos bien desarrollados hacen posible un comportamiento complejo bien coordinado. El exoesqueleto (que conserva el agua y brinda soporte) y las estructuras respiratorias especializadas (que permanecen húmedas y protegidas) hacen posible que los insectos y arácnidos habiten en terrenos secos. La diversificación de los insectos es aún mayor por su capacidad para volar. Los crustáceos, que incluyen los artrópodos más grandes, están restringidos a los hábitat húmedos, generalmente acuáticos, y respiran por medio de branquias.

Los gusanos redondos (filum Nematoda) poseen boca y ano separados, y una capa cuticular que mudan.

Las estrellas de mar, los erizos de mar y los pepinos de mar (filum Echinodermata) son un grupo exclusivamente marino. Al igual que otros invertebrados complejos y cordados, las larvas de los equinodermos son de simetría bilateral; sin embargo, los adultos muestran simetría radial. Esto, además de un sistema nervioso primitivo que carece de cerebro, los adapta a una existencia relativamente sedentaria. El cuerpo de los equinodermos está sostenido por un esqueleto interno inerte que proyecta extensiones a través de la piel. El sistema vascular acuoso, que interviene en la locomoción, alimentación y respiración, es una característica exclusiva de los equinodermos.

El filum Chordata incluye dos grupos de invertebrados, los anfioxos y tunicados, así como a los vertebrados.

TÉRMINOS CLAVE

cefalización *pág. 447*
celoma *pág. 444*
cordones nerviosos *pág. 450*
deuterostoma *pág. 445*
ectodermo *pág. 443*
endodermo *pág. 443*
endoesqueleto *pág. 463*
esqueleto hidrostático *pág. 452*
exoesqueleto *pág. 456*
ganglio *pág. 450*
gemación *pág. 447*
hemocele *pág. 454*
hermafrodita *pág. 450*
invertebrado *pág. 445*
larva *pág. 458*
mesodermo *pág. 443*
metamorfosis *pág. 458*
muda *pág. 457*
ojo compuesto *pág. 458*
parásito *pág. 450*
protostoma *pág. 445*
pupa *pág. 458*
segmentación *pág. 452*
seudoceloma *pág. 444*
simetría bilateral *pág. 443*
simetría radial *pág. 443*
sistema circulatorio abierto *pág. 454*
sistema circulatorio cerrado *pág. 452*
tejido *pág. 443*
vertebrado *pág. 445*

RAZONAMIENTO DE CONCEPTOS

Lista las características que distinguen a cada uno de los fila explicados en este capítulo, y da un ejemplo de cada uno.

Describe brevemente cada una de las siguientes adaptaciones y explica su importancia adaptativa: simetría bilateral, cefalización, sistema circulatorio cerrado, celoma, simetría radial, segmentación.

3. Describe y compara los sistemas respiratorios en las tres clases de artrópodos principales.
4. Describe las ventajas y desventajas del exoesqueleto de los artrópodos.
5. Indica en cuál de las tres clases de moluscos principales se presenta cada una de las siguientes características:

a) dos conchas con bisagra
b) una rádula
c) tentáculos
e) algunos miembros sésiles
e) los cerebros más desarrollados
f) numerosos ojos

6. Menciona tres funciones del sistema vascular acuoso de los equinodermos.
7. La simetría radial es una adaptación ¿a qué modo de vida? ¿Y la simetría bilateral?

APLICACIÓN DE CONCEPTOS

1. La clase Insecta es el taxón más grande de animales sobre la Tierra. Su mayor diversidad se localiza en los trópicos, donde la destrucción del hábitat y la extinción de las especies está ocurriendo a un ritmo alarmante. ¿Qué argumentos biológicos, económicos y éticos utilizarías para persuadir a los países y a los gobiernos de que preserven esta diversidad biológica?
2. Explica cuando menos tres formas en que la capacidad para volar ha contribuido al éxito y la diversidad de los insectos.
3. Discute y defiende los atributos que usarías para definir el éxito biológico entre los animales. ¿Los humanos son un éxito biológico según esos criterios? ¿Por qué?

PARA MAYOR INFORMACIÓN

Adis, J., Zompro, O., Moombolah-Goagoses, E. y Marais E. "Gladiators: A New Order of Insects". *Scientific American*, noviembre de 2002. Un insecto poco común, que se encontró fosilizado en ámbar, es miembro de un orden previamente desconocido. Después se descubrieron en África representantes vivientes del nuevo grupo.

Brusca, R. C. y Brusca, G. J. *Invertebrates.* Sunderland, MA: Sinauer, 1990. Una investigación a fondo de los animales invertebrados en formato de libro de texto, pero de fácil lectura y con infinidad de bellos dibujos informativos.

Chadwick, D. H. "Planet of the Beetles". *National Geographic*, marzo de 1998. La belleza y diversidad de los escarabajos, que abarcan una tercera parte de los insectos del mundo, descritos tanto en texto como en fotografías.

Conniff, R. "Stung". *Discover*, junio de 2003. La función, evolución y diversidad de las picaduras de hormigas, abejas y avispas.

Conover, A. "Foreign Worm Alert". *Smithsonian*, agosto de 2000. Insectos nocturnos en fuga y anélidos importados que se emplean como carnada de pesca amenazan los ecosistemas de Norteamérica.

Hamner, W. "A Killer Down Under". *National Geographic*, agosto de 1994. Entre los animales más ponzoñosos del mundo está la medusa que habita cerca de la costa del norte de Australia.

Kunzig, R. "At Home with the Jellies". *Discover*, septiembre de 1997. Un relato de los biólogos que estudian las medusas sobre algunos de sus descubrimientos. Incluye excelentes fotografías.

Morell, V. "Life on a Grain of Sand", *Discover*, abril de 1995. La arena que hay debajo de las aguas poco profundas es el hogar de una variedad increíble de criaturas microscópicas.

Scigliano, E. "Through the Eye of an Octopus". *Discover,* octubre de 2003. ¿Qué tan inteligentes son los cefalópodos? ¿Cómo intentan los científicos dar respuesta a esta pregunta?

Stix, G. "A Toxin Against Pain". *Scientific American*, abril de 2005. El veneno que mata a los peces producido por un caracol depredador contiene sustancias que podrían ser valiosas en medicina.